SEMESTER 3

TEKNIK PENGENDALIAN INSTRUMEN LOGAM

KELAS

X

TEKNIK PENGENDALIAN INSTRUMEN LOGAM

Jilid 1

Untuk Kelas XI Semester 3

Teknik Instrumentasi Logam

Buku Mata Pelajaran SMK
Bidang Keahlian Teknologi Dan Rekayasa
Program Keahlian Teknik Instrumentasi Industri
Paket Keahlian Teknik Instrumentasi Logam

TEKNIK PENGENDALIAN INSTRUMEN LOGAM

Jilid 1

Untuk Kelas XI Semester 3

Teknik Instrumentasi Logam

Buku Mata Pelajaran SMK
Bidang Keahlian Teknologi Dan Rekayasa
Program Keahlian Teknik Instrumentasi Industri
Paket Keahlian Teknik Instrumentasi Logam

PENULIS

KATA PENGANTAR

Kurikulum 2013 dirancang untuk memperkuat kompetensi siswa dari sisi pengetahuan, keterampilan dan sikap secara utuh. Proses pencapaiannya melalui pembelajaran sejumlah mata pelajaran yang dirangkai sebagai suatu kesatuan yang saling mendukung pencapaian kompetensi tersebut.

Buku ini disusun untuk dipergunakan dalam proses pembelajaran pada mata pelajaran **Teknik Pengendalian Instrumen Logam** yang merupakan Mata Pelajaran Paket Keahlian Teknik Instrumentasi Logam, Program Keahlian Teknik Instrumentasi Industri, Bidang Keahlian Teknologi Dan Rekayasa, Sekolah Menengah Kejruan. Dalam penyusunannya Buku ini terdiri dari Dua jilid, dimana jilid 1 dipergunakan untuk pembelajaran siswa di kelas XI semester Tiga, jilid 2 dipergunakan untuk pembelajaran siswa di kelas XI semester Empat.

Sesuai dengan konsep Kurikulum 2013, buku ini disusun mengacu pada pembelajaran menggunakan pendekatan saintifik untuk menemukan konsep yang sedang dipelajar melalui deduksi. Karenanya siswa diusahakan ditumbuhkan kreatifitasnya melalui bimbingan oleh guru. Materi Pembuatan Komponen Instrumen Logam disusun secara terpadu dan utuh, sehingga setiap pengetahuan, keterampilan dan sikap yang diajarkan, pembelajarannya harus dilanjutkan sampai membuat siswa kompeten sehingga menjadi landasan yang kuat untuk melanjutkan proses pembelajaran pada mata pelajaran paket keahlian. Pada akhirnya diharapkan siswa menyadari bahwa berbagai upaya dan teknologi yang dicipta manusia memiliki limit keterbatasan, sedangkan Tuhan Yang Maha Esa adalah maha sempurna. Siswa sebagai makhluk dapat mensyukuri terhadap potensi yang diberikan Tuhan kepadanya dan anugerah alam semesta yang dikaruniakan kepadanya melalui pemanfaatan yangbertanggung jawab.

Buku ini menjabarkan usaha minimal yang harus dilakukan siswa untuk mencapai kompetensi yang diharapkan. Sesuai dengan pendekatan yang dipergunakan dalam Kurikulum 2013, siswa diberanikan untuk mencari dari sumber belajar lain yang tersedia dan terbentang luas di sekitarnya. Peran guru sangat penting untuk meningkatkan dan menyesuaikan daya serap siswa dengan ketersediaan kegiatan pada buku ini. Guru dapat memperkayanya dengan kreasi dalam bentuk kegiatan-kegiatan lain yang sesuai dan relevan dengan kompetensi keahian yang ditekuni siswa serta kondisi lingkungan sekolah.

Sebagai edisi pertama, buku ini sangat terbuka dan terus dilakukan perbaikan dan penyempurnaan. Untuk itu, kami mengundang para pembaca memberikan kritik, saran dan masukan untuk perbaikan dan penyempurnaan pada edisi berikutnya. Atas kontribusi tersebut, kami ucapkan terima kasih. Mudah-mudahan kita dapat memberikan yang terbaik bagi kemajuan dunia pendidikan dalam rangka mempersiapkan generasi seratus tahun Indonesia Merdeka (2045).

................, November 2013

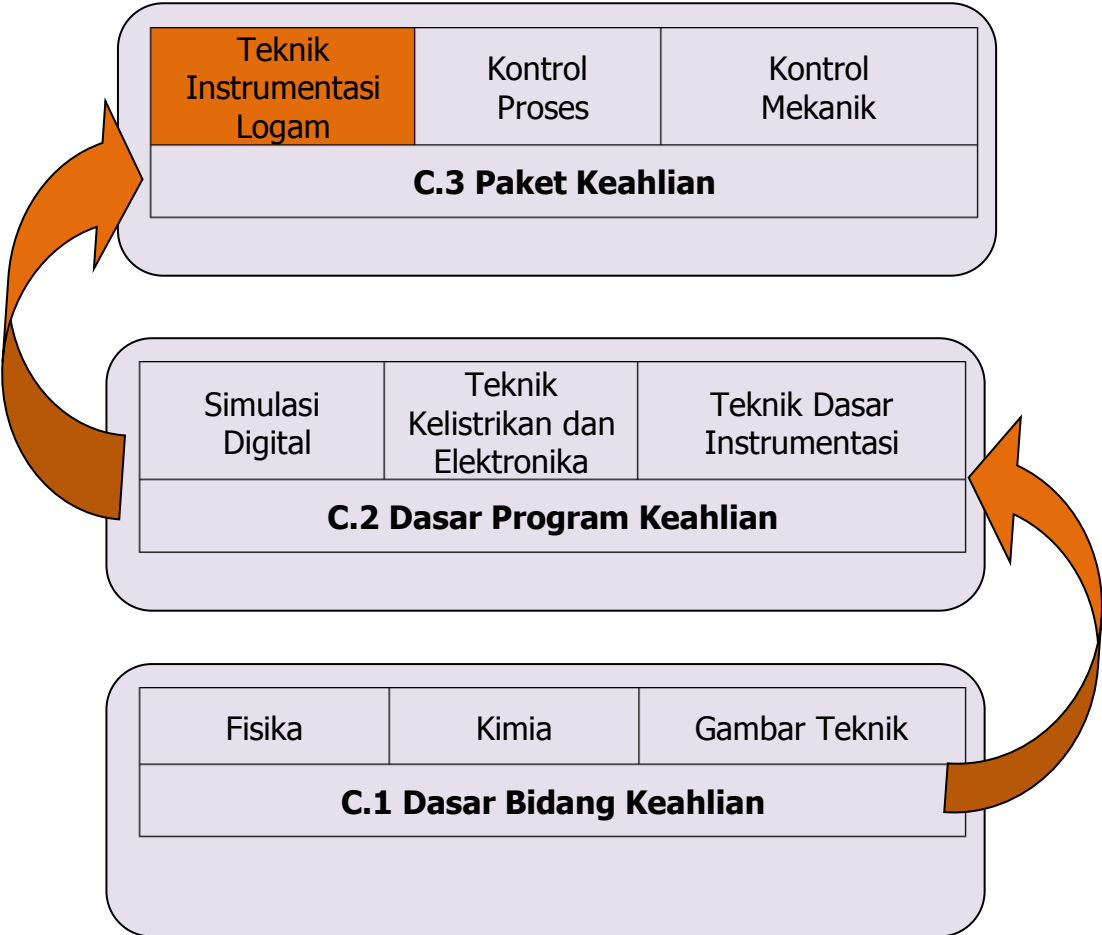
DAFTAR ISI

Bab 3 Sensor Dan Transduser

Bab 4 Pengendalian Secara Digital

Peta Kedudukan Bahan Ajar

Peta kedudukan bahan ajar ini merupakan diagram,yang menunjukan tahapan atau tata urutan pencapaian kompetensi yang diajarkan dan dilatihkan kepada siswa, dalam kurun waktu yang dibutuhkan.

Dengan membaca peta kedudukan bahan ajar ini, dapat dilihat urutan logis pembelajaran Bidang Keahlian Teknologi Dan RekayasaProgram KeahlianTeknik Instrumentasi Industri. Guru dan siswa dapat menggunakanBuku Teks Bahan Ajar Siswa ini, sesuai dengan urutan pada diagram ini.

Glosarium

Sistem : kombinasi beberapa komponen yang bekerja secara bersama-sama dan membentuk suatu tujuan tertentu.

Proses (alamiah) : suatu urutan operasi yang kontinu atau suatu perkembangan yangdicirikan leh urutan perubahan secara perlahan yang terjadi tahap demi tahap dengan cara yang relatif tetap dan memberikan suatu hasil atau akhir

Proses (artifisial) : operasi yang dilakukan secara berkesinambungan yang terdiridari beberapa aksi yang dikendalikan atau pergerakan yang secara sistematikdiarahkan pada suatu hasil atau akhir.

Plant : dapat berupa bagian suatu peralatan yang berfungsi secara bersama-sama untuk membentuk suatu operasi tertentu.

Gangguan : suatu sinyal yang cenderung mempengaruhi (secara acak) nilai output suatu sistem: gangguan internal dan eksternal.

Sistem kendali umpan balik (*feedback control system*) : sistem kendali yangmempunyai elemen umpan balik, yang berfungsi untuk mengamati keluaran yang terjadi untuk dibandingkan dengan masukannya (yang diinginkan). Sistem kendali kadang dibedakan menjadi dua kelas. Jika tujuan sistem kendali untukmempertahankan variabel fisik pada beberapa nilai yang konstan dengan adanya gangguan-gangguan, disebut sebagai.

pengatur (*automatic regulating system*). Contohnya adalah sistem kendali suhu dan lain-lain. Jenis yang kedua adalah

sistem kendali posisi atau servo mekanisme (*servomechanism*), yaitu sistem yangdigunakan untuk mengendalikan posisi atau pergerakan mekanis, seringkalidigunakan untuk menggambarkan sistem kendali dengan variabel fisik yang harus mengikuti atau melacak, dalam fungsi waktu yang diinginkan. Contohnya adalah gerakan lengan robot dan lain-lain.

Sistem kendali proses (*process control system*) : sistem kendali yang umum digunakan pada industri, seperti untuk mengendalikan temperatur, tekanan, aliran,tinggi muka cairan dan lain-lain.

Sistem kendali lingkar terbuka (*open loop system*) : sistem kendali dimana tidak terdapat elemen yang mengamati keluaran yang terjadi untuk dibandingkan dengan masukannya (yang diinginkan), meskipun menggunakan sebuah

pengendali (*controller*) untuk memperoleh tanggapan yang diinginkan.

Sistem kendali lingkar tertutup (*closed loop system*): sebutan lain dari sistem kendali dengan umpan balik.

PENDAHULUAN

A. Deskripsi

Pada bab ini kamu akan mempelajari gambaran secara umum mengenai sistem kendali, definisi-definisi, pengertian sistem kendali lingkar tertutup dan sistem kendali lingkar terbuka, pengelompokkan sistem kendali, prinsip-prinsip sistem kendali serta komponen komponen sistem kendali.

Sistem kendali atau sistem kontrol dipergunakan pada sebuah alat otomatis dengan berbagai piranti berbasis listrik elektronik, mekanik, hidrolik dan pneumatik serta instrument ukur yang terintergrasi. Karenanya kamu hendaknya telah memprlajari prinsip dasar dari materi tersebut.

Dengan mempelajari mata pelajaran ini, kamu akan memahami bagaimana sistem otomasi dikontrol atau dikendalikan. Instrumen logam' merupakan salah satu piranti yang digunakan dalam mengukur dan mengontrol proses kerja sistem otomasi. Kamu akan lebih memahami bagaimana perawatan instrument logam dengan mempelajari sistim kendali ini.

B. Prasyarat

Kemampuan awal Siswa sebelum mempelajari Buku Teks Bahan Ajar Siswa "Pembuatan Komponen Instrumen Logam" yaitu siswa telah memahami :

1. Gambar Teknik
2. Menggunakan perkakas tangan
3. Teknik Kelistrikan dan Elektronika
4. Simulasi Digital
5. Teknik Dasar Instrumentasi

C. Petunjuk Penggunaan

1. Petunjuk penggunaan bagi Siswa :

a. Siswa diharapkan telah memahami mata pelajaran atau materi yang menjadi prasarat pembelajaran modul ini.
b. Lakukan kegiatan pembelajaran secara berurutan dari Bab 1 ke Bab berikutnya.
c. Rencanakan kegiatan belajar bersama guru, dan isilah pada kolom yang disiapkan pada tabel rencana pembelajaran.
d. Pelajari dan pahami setiap uraian materi dengan seksama.
e. Lakukan kegiatan yang diberikan pada uraian materi pembelajaran, kegiatan tersebut dirancang dalam bentuk; eksplorasi, diskusi,asosiasi, dan evaluasi hasil belajar pada setiap akhir bab.
f. Kegiatan praktik kejuruan dilaksanakan dalam bentuk latihan keterampilan, kerjakan latihan tersebut dibawah pengawasan guru.
g. Persiapkan alat dan bahan yang digunakan pada setiap pembelajaran untuk menyelesaikan tugas dan evaluasi hasil belajar
h. Lakukan setiap kegiatan dengan tekun, teliti dan hati-hati dengan menerapkan kesehatan dan keselamatan kerja.
i. Jawablah soal evaluasi pada bagian review, penerapan dan tugas sesuai perintah yang diberikan.
j. Uji kompetensi kejuruan adalah tugas proyek untuk mengevaluasi capaian keterampilan siswa, kerjakan uji kompetensi sesuai petunjuk.
k. Siswa dinyatakan tuntas menyelesaikan materi pada bab terkait, jika siswa menyelesaikan kegiatan yang ditugaskan dan menyelesaikan kegiatan evaluasi dengan nilai minimal sama dengan KKM (Kriteria Kelulusan Minimal).

2. Peran Guru:

a. Merencanakan kegiatan pembelajaran siswa sesuai silabus.
b. Mengarahkansiswa dalam merencanakan proses belajar
c. Memfasilitasi siswa dalam memahami konsep dan praktik.
d. Memberikan motivasi, membimbing dan mengarahkan siswa dalam melakukan kegiatan yang diberikan pada uraian materi pembelajaran. Kegiatan tersebut dirancang dalam bentuk; eksplorasi,asosiasi dan evaluasi.
e. Menekankan, selalu mengecek dan memfasilitasi penggunaan K3 sesuai kegiatan yang dilaksanakan.
f. Mengembangkan materi pembelajaranyang disesuaikan dengan kondisi siswa dan lingkungan sekolah.
g. Memberikan contoh, memandu dan melakukan pengawasan pelaksanaan tugas siswa yang berkaitan dengan pembelajaran praktik di laboratorium atau bengkel kerja.
h. Membantu Siswa untuk menetukan dan mengakses sumber belajar lain yang diperlukan untuk kegiatan pembelajaran.
i. Merencanakan seorang ahli/pendamping guru dari tempat kerja/industri untuk membantu jika diperlukan
j. Menyusun variasi kegiatan siswa, soal, latihan praktik dan uji kompetensi yang disesuaikan dengan kondisi siswa dan lingkungan sekolah.
k. Merencanakan proses penilaian dan menyiapkan perangkatnya
l. Memeriksa seluruh hasil pekerjaan siswa baik berupa hasil pelaksanaan kegiatan maupun jawaban dari evaluasi belajar dan uji kompetensi.
m. Mencatat dan melaporkan pencapaian kemajuan Siswa kepada yang berwenang.

D. Tujuan Akhir

Hasil akhir dari seluruh kegiatan belajar dalam buku teks bahan ajar siswa ini adalah Siswa mampu;

1. Mendeskripsikan sinyal analog dan digital pada sistem kendali
2. Menerapkan sistem bilangan digital
3. Mendeskripsikan gerbang dasar logika
4. Menerapkan teorema Aljabar Boolean pada penyederhanaan gerbang logika
5. Menganalisis rangkaian kombinasional gerbang logika
6. Merancang rangkaian digital pada sistem kendali
7. Mendeskripsikan sensor dan transducer
8. Mengidentifikasi komponen sensor dan tranduser pada sistem kendali
9. Mendeskripsikan prinsip kerja Mikroprosesor pada sistem kendali
10. Mendeskripsikan pemrograman mikroprosesor pada sistem kendali
11. Mengidentifikasikan sinyal analog dan digital pada sistem kendali
12. Menggunakan sistem bilangan digital pada sistem kendali
13. Menggunakan gerbang dasar logika
14. Menggunakan teorema Aljabar Boolean pada penyederhanaan logika
15. Merakit rangkaian kombinasional gerbang logika
16. Membuat rangkaian digital pada sistem kenali
17. Memilah komponen sensor dan tranduser
18. Menggunakan komponen sensor dan tranduser pada sistem kendali

E. Kompetensi Inti dan Kompetensi Dasar

BIDANG KEAHLIAN : TEKNOLOGI DAN REKAYASA

PROGRAM KEAHLIAN : TEKNIK INSTRUMENTASI INDUSTRI

MATA PELAJARAN : TEKNIK DASAR INSTRUMENTASI

KOMPETENSI INTI DAN KOMPETENSI DASAR
MATA PELAJARAN TEKNIK PENGENDALIAN INSTRUMEN LOGAM
UNTUK SMK

KELAS XI

KOMPETENSI INTI	KOMPETENSI DASAR
1. Menghayati dan mengamalkan ajaran agama yang dianutnya.	1.1. Mengamalkan nilai-nilai ajaran agama dalam melaksanakan pekerjaan di bidang teknik pengukuran besaran instrumen
2. Menghayati dan mengamalkan perilaku jujur, disiplin, tanggungjawab, peduli (gotong royong, kerjasama, toleran, damai), santun, responsif dan proaktif, dan menunjukkan sikap sebagai bagian dari solusi atas berbagai permasalahan dalam berinteraksi secara efektif dengan lingkungan sosial dan alam serta dalam menempatkan diri sebagai cerminan bangsa dalam pergaulan dunia	2.1. Memiliki motivasi internal, kemampuan bekerjasama, konsisten, rasa percaya diri, dan sikap toleransi dalam perbedaan konsep berpikir, dan strategi menyelesaikan masalah dalam melaksanakan pekerjaan di bidang teknik pengukuran besaran instrumen 2.2. Mampu mentransformasi diri dalam berperilaku: teliti, kritis, disiplin, dan tangguh mengadapi masalah dalam melakukan tugas di bidang Teknik Pengukuran Besaran Instrumen. 2.3. Menunjukkan sikap bertanggung jawab, rasa ingin tahu, santun, jujur, dan perilaku peduli lingkungan dalam melakukan pekerjaan di bidang teknik pengukuran besaran instrumen
3. Memahami, menerapkan dan menganalisis pengetahuan faktual, konseptual, dan prosedural berdasarkan rasa ingin tahunya tentang ilmu pengetahuan, teknologi, seni, budaya, dan humaniora dalam wawasan kemanusiaan, kebangsaan, kenegaraan, dan peradaban terkait penyebab fenomena dan kejadian dalam bidang kerja yang spesifik	3.2 Mendeskripsikan sistem logika digital 3.3 Mendeskripsikan sensor dan transducer sebagai sistem kendali 3.4 Mendeskripsikan prinsip operasional system kendali digital 3.5 Mendeskripsikan mikro-prosessor pada sistim pengendalian besaran 3.6 Menerapkan mikro-kontroller pada sistim pengendalian besaran 3.7 Menganalisis alat kontrol besaran proses 3.8 Menerapkan prinsip kerja dan karakteristik

KOMPETENSI INTI	KOMPETENSI DASAR
untuk memecahkan masalah.	komponen elektromagnetik 3.9 Menganalisis rangkaian elektromagnetik berbasis relay pada sistem kontrol
4. Mengolah, menalar, dan menyaji dalam ranah konkret dan ranah abstrak terkait dengan pengembangan dari yang dipelajarinya di sekolah secara mandiri, dan mampu melaksanakan tugas spesifik di bawah pengawasan langsung	4.2 Menggunakan sistim logika digital 4.3 Menggunakan sensor dan transducer sebagai sistim kendali 4.4 Menggunakan prinsip operasional sistem kendali digital 4.5 Membuat aplikasi mikro-prosessor pada sistim pengendalian besaran 4.6 Membuat aplikasi mikro-kontroller pada sistim pengendalian besaran 4.7 Mengolah alat kontrol besaran proses 4.8 Menggunakan komponen elektromagnetik pada sistem kontrol pendalian besaran 4.9 Merakit rangkaian elektromagnetik berbasis relay pada sistem kontrol mekanik

F. Cek Kemampuan Awal

Berilah tanda silang (x) pada tabel dibawah ini, dengan pilihan "ya" atau "tidak" dengan sikap jujur dan dapatdipertanggungjawabkan untuk mengetahui kemampuan awal yang telah Kamu (Siswa) miliki.

No	Pernyataan	Dapat Melakukan Pekerjaan Dengan Kompeten		Jika "Ya" Kerjakan
		Ya	Tidak	
1	• Mendeskripsikan sinyal analog dan digital pada sistem kendali • Menerapkan sistem bilangan digital • Mendeskripsikan gerbang dasar logika • Menerapkan teorema Aljabar Boolean pada penyederhanaan gerbang logika • Menganalisis rangkaian kombinasional gerbang logika • Merancang rangkaian digital pada sistem kendali • Mengidentifikasikan sinyal analog dan digital pada sistem kendali • Menggunakan sistem bilangan digital pada sistem kendali • Menggunakan gerbang dasar logika • Menggunakan teorema Aljabar Boolean pada penyederhanaan logika • Merakit rangkaian kombinasional gerbang logika			Evaluasi Belajar Bab 2
2	• Mendeskripsikan sensor dan transducer • Mengidentifikasi komponen sensor dan tranduser pada sistem kendali • Membuat rangkaian digital pada sistem kendali • Memilah komponen sensor dan tranduser • Menggunakan komponen sensor dan tranduser pada sistem kendali			Evaluasi Belajar Bab 3
3	• Mendeskripsikan prinsip kerja Mikroprosesor pada sistem kendali			Evaluasi Belajar Bab 4

SISTEM DIGITAL DASAR

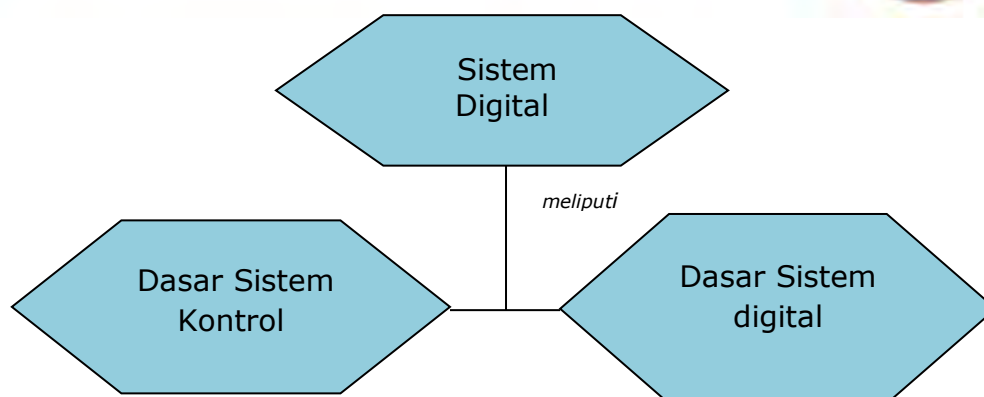
Kata Kunci:

- **Sistem Kontrol**
- **Sistem Bilangan**
- **Besaran Digital**
- **Aljabar Boolean**
- **Operasi logika**

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari Bab 2 ini, Kamu diharapkan dapat;

1. Memahami sistem kontrol
2. Mengidentifikasi sistem kontrol otomatis
3. Memberikan contoh sistem control industry
4. Mengidentifikasi jenis sistem control
5. Memahami pengkondisian sinyal digital
6. Mengidentifikasi Komponen Sistem Kendali
7. Memahami sistem digital dasar
8. Memahami sistem bilangan
9. Memahami besaran digital
10. Memahami operasi logika

Peta Konsep

Rencana Belajar Siswa

Pada hari ini, ... tanggal ....tahun .... Guru beserta siswa merencanakan pelaksanaan kegiatan belajar sebagaimana tabel di bawah ini

No	Jenis kegiatan	Tanggal	Waktu	Tempat belajar	Catatan Perubahan
1	Memahami sistem control				
2	Memahami Sistem digital				
3	Mengerjakan soal evaluasi				

............................., ...

Guru	Orangtua/Wali Siswa	Siswa
....	....	....

Uraian Materi

A. Dasar Sistem Kontrol

1. Apa yang dimaksud dengan sistem kontrol?

Untuk menjawab pertanyaan itu, kamu dapat mengatakan bahwa dalam kehidupan sehari-hari, tedapat sejumlah tujuan yang harus dicapai. Misalnya, dalam bidang rumah tangga, kita perlu mengatur suhu dan kelembaban rumah dan bangunan untuk kenyamanan hidup. Untuk transportasi, kita harus mengendalikan mobil dan pesawat untuk bergerak dari satu lokasi kelokasi lainnnya dengan aman dan akurat

Pada bidang industri, proses manufaktur mempunyai sejumlah tujuan untuk mendapatkan hasil yang akan memuaskan permintaan ketelitian dan keefektifan biaya. Manusia mempunyai kemampuan untuk melaksanakan tugas dalam ruang lingkup yang luas, termasuk di dalamnya pembuatan keputusan. Beberapa tugas ini seperti mengambil benda dan berjalan dari satu tempat ke tempat lainnya, sering dikerjakandengan cara yang biasa. Pada kondisi tertentu, beberapa dari tugasini dilakukan dengan cara sebaik mungkin. Misalnya, seorang pelari 100 yard mempunyai tujuan untuk berlari dalam jarak tersebut dalam waktu sesingkatnya. Seorang pelari maraton, tidak hanya harus berlari dalam, jarak tersebut secepat mungkin, tapi untuk mencapai hal tersebut dia harus mengatur pemakaian energi dan memikirkan cara terbaik untuk perlombaan tersebut. Cara untuk mencapai tujuan ini biasanya melibatkan penggunakan sistem kontrol yang melaksanakan strategi kontrol tertentu.

Kontrol automatik (otomatis) telah memegang peranan yangsangat penting dalam perkembanganilmu dan teknologi. Di samping sangat

diperlukan pada pesawat ruang angkasa, peluru kendali, sistem pengemudian pesawat, dansebagainya kontrol automatik telah menjadi bagian yang penting danterpadu dari proses-proses dalam pabrik dan industri modern. Misalnya,kontrol otomatis perlu sekali dalam kontrol numerik dari mesin alat-alatbantu di industri juga perlu sekali dalam operasi industri sepertipengontrolan tekanan, suhu,kelembaban, viskositas, dan arusdalam industri proses.

Karena kemajuan dalam teori dan praktek kontrol automatik memberikan kemudahan dalam mendapatkan performansi dari sistem dinamik, mempertinggi kualitas dan menurunkan biaya produksi, mempertinggi laju produksi, meniadakan pekerjaan-pekerjaan rutin dan membosankan yang harus dilakukan oleh manusia, dan sebagainya, maka sebagian besar insinyur dan ilmuwan sekarang harus mempunyai pemahaman yang baik dalam bidang ini.

Sejarah Perkembangan system kontrol dapat diceritakan sebagai berikut. Hasil karya pertama yang penting dalam kontrol automatik adalah governor sentrifugal untuk pengontrolan kecepatan mesin uap yang dibuat oleh James Watt pada abad kedelapanbelas. Hasil karya lain yang penting pada tahap awal perkembangan teori kontrol dibuat oleh Minorsky, Hazen, Nyquist, dan sebagainya. Pada tahun 1922, Minorsky membuat kontroler automatik untuk pengemudian kapal dan menunjukkan cara menentukan kestabilan dari persamaan diferensial yang melukiskan sistem. Pada tahun 1932 Nyquist mengembangkan suatu prosedur yang relatif sederhana untuk menentukan kestabilan sistem loop tertutup pada basis respons loop terbuka terhadap masukan tunak (*steady state*) sinusoida. Pada tahun 1934 Hazen, yang memperkenalkan istilah servomekanisme untuk sistem kontrol posisi, membahas disain servomekanisme relay yang mampu mengikuti dengan baik masukan yang berubah.

Selama dasa warsa 1940-an, metode respons frekuensi memungkinkan ara insinyur untuk mendisain sistem kontrol linear berumpan-balik yang memenuhi persyaratan kinerja. Dari akhir tahun 1940

hingga awal tahun 1950, metode tempat kedudukan akar dalam disain sistem kontrol benar-benar telah berkembang.

Metode respons frekuensi dan tempat kedudukan akar, yang merupakan inti teori kontrol fisik, akan membawa kita ke sistem yang stabil dan memenuhi seperangkat persyaratan kinerja yang hampir seimbang. Sistem semacam itu pada umumnya tidak optimal dalam setiap pengertian yang berarti. Semenjak akhir tahun 1950, penekanan persoalan dalam disain sistem kontrol telah digeser dari disain salah satu dari beberapa sistem yang bekerja menjadi disain satu sistem optimal dalam suatu pengertian yang berarti.

Karena *plant* modern dengan multi-masukan dan multi-keluaran menjadi semakin kompleks, maka deskripsi sistem kontrol modern memerlukan banyak persamaan. Teori kontrol klasik, yang hanya membahas sistem satu masukan satu keluaran, sama sekali tidak dapat digunakan untuk sistem multi-masukan multikeluaran. Semenjak sekitar tahun 1960, teori kontrol modern telah dikembangkan untuk mengatasi bertambah kompleksnya *plant* modern dan persyaratan yang keras pada ketelitian, berat, dan biaya untuk kebutuhan militer, ruang angkasa, dan industri.

Dengan adanya komputer elektronik analog, digital, dan hibrid yang dapat digunakan pada perhitunganperhitungan yang kompleks, maka penggunaan komputer dalam disain sistem kontrol dan penggunaan komputer yang dipasang langsung pada sistem kontrol sekarang menjadi praktis dan umum. Komputer analog adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan alat penghitung yang bekerja pada level analog, dengan arus searah. Level analog di sini adalah lawan dari level digital, yang mana level digital adalah level tegangan *high* (tinggi) dan *low* (rendah), yang digunakan dalam implementasi bilangan biner (hanya mempunya 2 jenis nilai, yaitu 0 atau 1). Secara mendasar, komponen elektronik yang digunakan sebagai inti dari komputer analog adalah opamp

Tentunya pada komputer digital yang bekerja adalah menggunakan level digital. Komputer yang sering kita jumpai sekarang ini termasuk dalam jenis komputer digital, kalkulator salah satunya. Sedangkan komputer hibrid

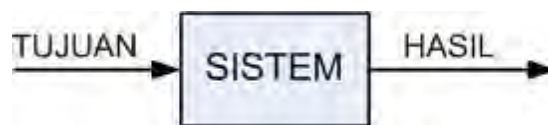
sendiri merupakan gabungan antara komputer analog (dengan arus searah) dan digital. Dengan demikian kombinasi komputer analog yang memberikan kemampuan dalam hal kecepatan, keluwesan dan kemudahan untuk berkomunikasi langsung dengan kemampuan komputer digital dalam hal kecermatan, logika dan ingatan, maka sangatlah besar manfaatnyadidunia keilmuan. Simulasi yang dinamik dan kemampuan pemecahan persamaan diferensial dengan kecepatantinggi dapat dilaksanakan oleh bagian analog, sementara olahan statis dan aljabar dapat ditangani di bagian digital. Dengan demikian daya guna dan hal ekonomi, secara keseluruhan dari suatu sistem dapat dimaksimalkan.

Pada tahun-tahun belakangan ini, sistem kontrol memegang peranan penting dalam perkembangan dan kemajuan peradaban dan teknologi modern. Dalam prakteknya, setiap aspek aktivitas sehari-hari dipengaruhi oleh beberapa model sistem kontrol. Sistem kontrol sangat banyak ditemukan di setiap sektor industri, seperti pengendalian kualitas dari produk yang dihasilkan, lajur pemasangan otomatik, pengendalian mesin, teknologi luar angkasa dan sistem persenjataan, pengendalian komputer. sistem transportasi, sistem daya, robotik, dan lan-lain. Bahkan pengendalian dari sistem persedian barang, sosial dan ekonomi dapat didekati dengan teori kontrol automatik.

Perkembangan baru-baru ini dalam teori kontrol modern adalah dalam bidang kontrol optimal baik sistem deterministik (tertentu) maupun stokastik (acak), demikian juga kontrol belajar dan adaptif dari sistem yang rumit. Dewasa ini komputer digital telah menjadi lebih murah dan semakin ringkas, maka digunakan sebagai bagian integral dari sistem kontrol. Penerapan teori kontrol modern dewasa ini juga meliputi sistem yang bukan rekayasa, seperti sistem biologi, biomedikal, ekonomi dan sosial ekonomi.

Variabel yang dikontrol adalah besaran atau keadaan yang diukur dan dikontrol. Variabel yang dimanipulasi adalah besaran atau keadaan yang diubah oleh kontroler untuk mempengaruhi nilai variabel yang dikontrol. Dalam keadaan normal, variabel yang dikontrol adalah keluaran dari sistem. Kontrol berarti mengukur nilai dari variabel sistem yang dikontrol dan

menerapkan variabel yang dimanipulasi ke sistem untuk mengoreksi atau membatasi penyimpangan nilai yang diukur dari nilai yang dikehendaki.

Pada penelaahan rekayasa, kita perlu menentukan istilah-istilah tambahan yang diperlukan untuk menjelaskan sistem kontrol, seperti misalnya: *plant*, *gangguan-gangguan, kontrol umpan balik, dan sistem kontrol umpan balik*. Berikut ini akan diberikan definisi-definisi tersebut. Kemudian penjelasan mengenai sistem loop tertutup dan loop terbuka, dan juga kelebihan-kelebihan dan kekurangan-kekurangannya dibandingkan dengan sistem kontrol loop terbuka dan loop tertutup.

Gambar 2.1 Blok Diagram Sistem Kontrol Secara Umum

Istilah *plant* didefinisikan sebagai seperangkat peralatan, mungkin hanya terdiri dari beberapa bagian mesin yang bekerja bersama-sama, yang digunakan untuk melakukan suatu operasi tertentu. Dalam buku ini, setiap obyek fisik yang dikontrol (seperti tungku pemanas, reaktor kimia, dan pesawat ruang angkasa) disebut plant.

Istilah proses (*process*) menurut kamus Merriam-Webster mendefinisikan proses sebagai operasi atau perkembangan alamiah yang berlangsung secara kontinu yang ditandai oleh suatu deretan perubahan kecil yang berurutan dengan cara relatif tetap dan menuju ke suatu hasil atau keadaan akhir tertentu; atau suatu operasi yang sengaja dibuat, berlangsung secara kontinu, yang terdiri dari beberapa aksi atau perubahan yang dikontrol, yang diarahkan secara sistematis menuju ke suatu hasil atau keadaan akhir tertentu. Dalam buku ini, setiap operasi yang dikontrol disebut proses.

Sebagai contoh adalah proses kimia, ekonomi, dan biologi. Istilah sistem (*system*) didefinisikan sebagai kombinasi dari beberapa komponen yang bekerja bersama-sama dan melakukan suatu sasaran tertentu. Sistem tidak dibatasi hanya untuk sistem fisik saja. Konsep sistem dapat digunakan pada gejala yang abstrak dan dinamis seperti yang dijumpai dalam ekonomi.

Oleh karena itu, istilah *sistem* harus diinterpretasikan untuk menyatakan sistem fisik, biologi, ekonomi, dan sebagainya.

Istilah gangguan (*disturbances*) didefinisikan didefinisikan sebagai suatu sinyal yang cenderung mempunyai pengaruh yang merugikan pada harga keluaran sistem. Jika suatu gangguan dibangkitkan dalam sistem, disebut internal, sedangkan gangguan eksternal dibangkitkan di luar sistem dan merupakan suatu masukan.

Istilah kontrol umpan balik dapat dijelaskan sebagai berikut. Kontrol umpan balik mengacu pada suatu operasi, yang dengan adanya gangguan, cenderung mengurangi perbedaan antara keluaran dari sistem dan suatu acuan masukan dan bahwa hal itu dilakukannya berdasarkan pada perbedaan ini. Di sini hanya gangguan yang tidak diperkirakan yang ditentukan demikian, karena gangguan yang dapat diperkirakan atau gangguan yang diketahui dapat selalu dikompensasi di dalam sistem tersebut.

Istilah sistem kontrol umpan balik. Sistem yang mempertahankan hubungan yang ditentukan antara keluaran dan beberapa masukan acuan, dengan membandingkan mereka dan dengan menggunakan perbedaan sebagai alat kontrol dinamakan sistem kontrol umpan balik. Contoh untuk sistem ini adalah sistem kontrol suhu ruangan. Dengan mengukur suhu ruangan sebenarnya dan membandingkannya dengan suhu acuan (suhu yang dikehendaki), termostat menjalankan alat pemanas atau pendingin, atau mematikannya sedemikian rupa sehingga memastikan bahwa suhu ruangan tetap pada suhu yang nyaman tidak tergantung dari keadaan di luar.

Sistem kontrol umpan balik tidak terbatas di bidang rekayasa, tetapi dapat juga ditemukan di berbagai macam bidang bukan rekayasa. Tubuh manusia, misalnya, adalah sistem kontrol umpan balik yang sangat maju. Baik suhu tubuh maupun tekanan darah dijaga tetap konstan dengan alat umpan balik faal tubuh. Kenyataannya, umpan balik melaksanakan fungsi yang vital. Ia membuat tubuh manusia relatif tidak peka terhadap gangguan

eksternal, jadi memungkinkannya untuk berfungsi dengan benar di dalam Iingkungan yang berubah.

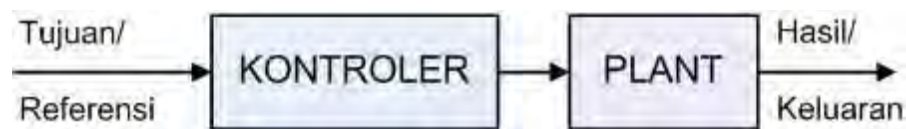
Sebagai contoh yang lain, tinjau kontrol dari kecepatan mobil oleh operator manusia. Pengemudi memutuskan kecepatan, yang sesuai dengan suatu keadaan, yang mungkin adalah batasan kecepatan yang tertera pada jalan raya atau jalan bebas hambatan yang bersangkutan. Kecepatan ini bertindak sebagai kecepatan acuan.

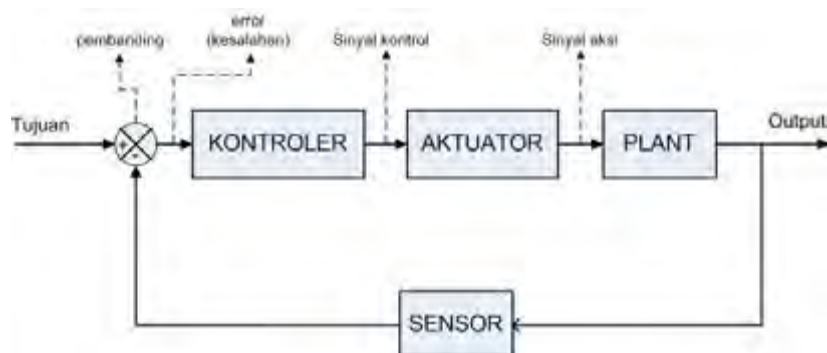
Pengemudi akan memperhatikan kecepatan sebenarnya dengan melihat speedometer. Jika dirasakan berjalan lebih lambat, ia akan menginjak pedal gas dan kecepatan mobil akan bertambah tinggi. jika kecepatan sebenarnya terlalu tinggi, ia melepaskan pedal gas dan mobil akan menjadi lambat. Operator manusia ini dapat dengan mudah diganti oleh alat mekanik, listrik,atau yang serupa. Sebagai pengganti pengemudi yang memperhatikan speedometer, maka dapat digunakan generator listrik untuk menghasilkan tegangan yang sebanding dengan kecepatan. Tegangan ini dapat dibandingkan dengan tegangan acuan yang berkaitan dengan kecepatan yang dikehendaki. Perbedaan dalam tegangan ini kemudian digunakan sebagai sinyal kesalahan untuk menggerakkan tuas yang menaikkan atau menurunkan kecepatan sesuai dengan yang diperlukan.

Istilah Sistem Servo atau sistem servomekanisme didefinisikan sebagai suatu sistem kontrol berumpan-balik dengan keluaran berupa posisi, kecepatan, atau percepatan mekanik. Oleh karena itu, istilah servomekanisme dan sistem pengontrolan posisi (atau kecepatan atau percepatan) adalah sinonim. Servomekanisme banyak digunakan dalam industri modern.

Contoh dari sistem servo mekanisme ini adalah operasi mesin alat bantu yang otomatis secara menyeluruh atau lengkap, bersamasama dengan instruksi yang diprogram, dapat dicapai dengan penggunaan sistem servo. Perlu diperhatikan bahwa sistem kontrol, yang keluarannya (seperti misalnya posisi pesawat terbang di angkasa pada suatu sistem pendaratan otomatis) perlu mengikuti jalan di angkasa yang telah ditentukan, dinamakan sistem servo juga. Contoh lainnya termasuk sistem kontrol lengan-robot, di mana

lengan robot harus mengikuti jalan tertentu di ruangan yang telah ditentukan, dan sistem pendaratan otomatis pesawat udara, dengan pesawat udara harus mengikuti jalan di angkasa yang telah ditentukan.

Istilah sistem kontrol otomatis didefinisikan sebagai sistem kontrol yang mempunyai umpan balik dengan acuan masukan atau keluaran yang dikehendaki dapat konstan atau berubah secara perlahan dengan berjalannya waktu, mempunyai tugas utama yaitu menjaga keluaran sebenamya berada pada nilai yang dikehendaki dengan adanya gangguan. Ada banyak contoh sistem kontrol otomatis, beberapa di antaranya adalah kontrol suhu ruangan mobil secara otomatis, pengatur otomatis tegangan pada *plant* daya listrik dengan adanya variasi beban daya listrik, kontrol otomatis tekanan dan suhu dari proses kimiawi dan kontrol suhu secara otomatis di ruangan.

Gambar 2.2 Blok Diagram Sistem Kontrol Loop Terbuka

Istilah sistem pengontrolan proses *(process control system)* merupakan sistem kontrol secara otomatis dengan keluaran berupa besaran seperti temperatur, tekanan, aliran, tinggi muka cairan atau pH disebut sistem pengontrolan proses. Pengontrolan proses secara luas digunakan di industri. Pengontrolan dengan program seperti pengontrolan temperatur tungku pemanas dengan temperatur tungku dikontrol sesuai instruksi yang telah diprogram terlebih dahulu seringkali digunakan pada sistem seperti itu.

Gambar 2.3 Blok Diagram Sistem Kontrol Loop Tertutup

Sebagai contoh, program yang harus diatur terlebih dahulu dapat berupa instruksi untuk menaikkan temperature tungku sampai harga tertentu yang lain selama selang waktu tertentu yang lain pula. Pada pengontrolan dengan program seperti itu, titik setel diubah sesuai dengan jadwal waktu yang telah ditentukan. Kontroler (pengontrol) kemudian berfungsi untuk menjaga temperatur tungku agar mendekati titik setel yang berubah. Harus diperhatikan bahwa sebagian besar sistem pengontrolan proses servo mekanisme sebagai bagian yang terpadu. Istilah sistem kontrol loop tertutup seringkali disebut sebagai sistem kontrol umpan balik. Secara praktis dan seringkali istilah kontrol umpan balik dan kontrol loop tertutup dapat saling dipertukarkan penggunaannya.

Pada sistem kontrol loop tertutup, sinyal kesalahan yang bekerja, yaitu perbedaan antara sinyal masukan sinyal umpan balik (yang mungkin sinyal keluarannya sendiri atau fungsi dari sinyal keluaran dan turunannya), disajikan ke kontroler sedemikian rupa untuk mengurangi kesalahan dan membawa keluaran sistem ke nilai yang dikehendaki. Istilah control loop tertutup selalu berarti penggunaan aksi kontrol umpan balik untuk mengurangi kesalahan sistem. Istilah sistem kontrol loop terbuka dapat didefinisikan sebagai suatu sistem yang keluarannya tidak mempunyai pengaruh terhadap aksi kontrol disebut *sistem kontrol loop terbuka*. Dengan kata lain, sistem kontrol loop terbuka keluarannya tidak dapat digunakan sebagai perbandingan umpan balik dengan masukan. Suatu contoh sederhana adalah mesin cuci. Perendaman, pencucian, dan pembilasan dalam mesin cuci dilakukan atas basis waktu. Mesin ini tidak mengukur sinyal keluaran yaitu tingkat kebersihan pakaian.

Dalam suatu sistem kontrol loop terbuka, keluaran tidak dapat dibandingkan dengan masukan acuan. Jadi, untuk tiap masukan acuan berhubungan dengan kondisi operasi tertentu, sebagai akibat, ketetapan dari sistem tergantung pada kalibrasi. Dengan adanya gangguan, sistem kontrol loop terbuka tidak dapat melaksanakan tugas seperti yang diharapkan.

Sistem kontrol loop terbuka dapat digunakan, hanya jika hubungan antara masukan dan keluaran diketahui dan tidak terdapat gangguan

internal maupun eksternal. Perbandingan antara sistem kontrol loop tertutup dan loop terbuka dijelaskan dibawah ini. Suatu kelebihan dari sistem kontrol loop tertutup adalah penggunaan umpanbalik yang membuat respons sistem relatif kurang peka tarhadap gangguan ekstemal dan perubahan internal pada parameter sistem. Jadi, mungkin dapat digunakan komponenkomponen yang relatif kurang teliti dan murah untuk mendapatkan pengontrolan *plant* dengan teliti, hal ini tidak mungkin diperoleh pada sistem loop terbuka.

Dan segi kestabilan, sistem kontrol loop terbuka lebih mudah dibuat karena kestabilan bukan merupakan persoalan utama. Sebaliknya, kestabilan dapat menjadi persoalan pada sistem kontrol loop tertutup karena bisa terjadi kesalahan akibat koreksi berlebih yang dapat menimbulkan osilasi pada amplitude konstan ataupun berubah. Harus ditekankan bahwa untuk sistem dengan masukan yang telah diketahui sebelumnya dan tidak ada gangguan, maka disarankan untuk menggunakan kontrol loop terbuka.

Sistem kontrol loop tertutup mempunyai kelebihan hanya jika terdapat gangguan yang tidak dapat diramal dan/atau perubahan yang tidak dapat diramal pada komponen sistem. Perhatikan bahwa batas kemampuan daya keluaran ikut menentukan biaya, berat, dan ukuran sebuah sistem kontrol. Jumlah komponen yang digunakan dalam sistem kontrol loop tertutup akan lebih banyak bila dibandingkan pada sistem kontrol loop terbuka. Sistem kontrol loop tertutup pasti membutuhkan instrumen untuk mengukur sebagian atau seluruh keluarannya. Oleh karena itu, sistem kontrol loop tertutup pada umumnya lebih besar dan mahal. Untuk memperkecil daya yang diperlukan oleh sistem, bila mungkin, dapat digunakan kontrol loop terbuka.

Kombinasi yang sesuai antara control loop terbuka dan tertutup biasanya lebih murah dan akan memberikan kinerja sistem keseluruhan yang diinginkan. Istilah sistem kontrol adaptif dijelaskan sebagai berikut. Karakteristik dinamik dari sebagian besar sistem kontrol adalah tidak konstan karena beberapa sebab, seperti memburuknya kinerja komponen dengan pertambahan waktu atau perubahan parameter dan sekeliling (sebagai contoh, perubahan massa dan kondisi atmosfir pada sistem kontrol

pesawat ruang angkasa). Walaupun pengaruh perubahan-perubahan kecil pada karakteristik dinamik diredam pada sistem kontrol berumpan-balik, jika perubahan sistem dan sekeliling cukup besar, maka suatu sistem yang baik harus mempunyai kemampuan untuk menvesuaikan diri (adaptasi).

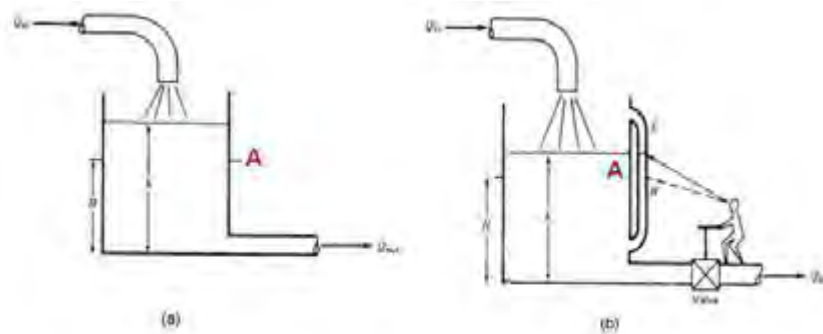
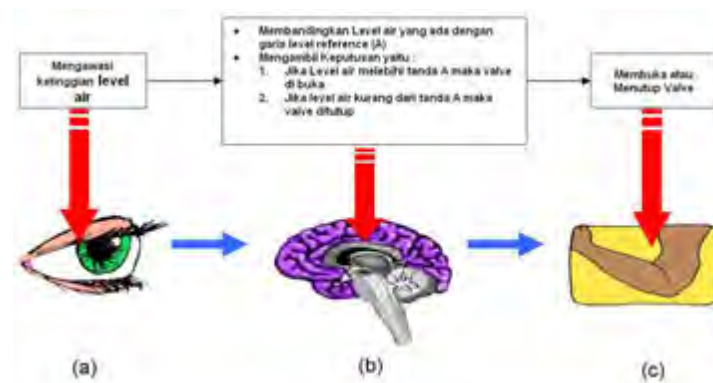
Adaptasi berarti kemampuan untuk mengatur diri atau memodifikasi diri sesuai dengan perubahan pada kondisii sekeliling atau struktur yang tidak dapat diramal. Sistem control yang mempunyai suatu kemampuan beradaptasi dalam keadaan bebas disebut *sistem kontrol adaptif*.

Pada sistem kontrol adaptif, karakteristik dinamik harus diidentifikasi setiap saat sehingga parameter kontroler dapat diatur untuk menjaga performansi optimal. Konsep ini menarik banyak perhatian disainer sistem kontrol karena sistem kontrol adaptif, di samping mengikuti perubahan sekeliling, juga akan menyesuaikan kesalahan-kesalahan atau ketidakpastian disain teknik yang layak dan akan mengkompensasi kerusakan sebagian kecil komponen komponen sistem sehingga memperbesar keandalan sistem keseluruhan.

Istilah sistem kontrol dengan penalaran dijelaskan sebagai berikut di bawah ini. Beberapa sistem control loop terbuka yang sering dijumpai dapat diubah menjadi sistem control loop tertutup, jika operator manusia dipandang sebagai kontroler, membanding-kan masukan dan keluaran kemudian melakukan aksi koreksi yang berdasarkan selisih atau kesalahan yang diperoleh. Jika kita berusaha menganalisis sistem kontrol loop tertutup yang melibatkan operator manusia semacam itu, kita akan menjumpai persoalan yang sulit dalam menuliskan persamaan yang menggambarkan perilaku manusia.

Salah satu dari beberapa faktor yang kompleks dalam kasus ini adalah kemampuan penalaran dari operator manusia. Jika operator mempunyai banyak pengalaman, ia akan menjadi kontroler yang lebih baik, dan hal ini harus diperhitungkan dalam menganalisis sistem semacam itu. Sistem kontrol yang mempunyai kemampuan untuk menalar disebut *sistem kontrol dengan penalaran* (learning control system). Konsep ini masih cukup baru dan menjadi kajian yang menarik.

2. Ilustrasi Sistem Kontrol

pada Manusia Pada Gambar 9.4 (a) bisa dilihat gambar mengenai penampung/tangki air. Disana terdapat air dengan kedalaman h, debit air masuk sebesar Q_{in} dan debit air keluar sebesar Q_{out}. Besar dari air yang masuk tidak bisa kita prediksi. Bisa jadi Qin besar sekali ataukah Qin sangat kecil sekali, bahkan tidak mengalir sama sekali.

Gambar 2.4 Penampung Air (a) dan dengan Operator Manusia (b)

Gambar 2.5 Proses Kontrol pada
Manusia (a) mata, (b) otak dan (c) tangan

Tanda A merupakan titik yang menunjukkan kedalaman/ketinggian air yang diinginkan, yaitu sebesar H. Diharapkan dari sistem ini ketinggian atau kedalaman air selalu sebesar H, tidak lebih tinggi dan tidak lebih rendah. Kalau memang yang terjadi adalah ketinggian atau kedalaman air tidak sama dengan H maka hal tersebut terjadi suatu kesalahan atau error. Agar

tujuan dari sistem tersebut bisa tercapai, yaitu mempertahankan nilai dari ketinggian atau kedalaman air sebenarnya (h) selalu sama dengan H, maka diperlukan seorang operator untuk mengontrol setiap kondisi yang terjadi, seperti terlihat pada Gambar 2.4 (b). Apa yang dilakukan oleh seorang operator manusia tersebut agar ketinggian atau kedalaman air bisa dipertahan kan pada level A (kedalaman sebesar H) ? Bagaimana proses yang terjadi dari ilustrasi tersebut ?

Tentunya dengan mudah bias kita jawab ketika kita melihat Gambar 2.4 (b). Operator akan membuka atau menutup katup/valve pada pipa untuk arah keluarnya air. Tentunya jika kedalaman air sebenarnya (h) lebih besar dari nilai kedalaman yang diinginkan (H) maka seorang operator atau penjaga air tersebut akan membuka katup/valve, sehingga kedalaman air akan berkurang, tentunya nilai dari h akan mendekati H. Sebaliknya jika kedalaman air sebenarnya di bawah kedalaman air yang diharapkan, maka tentunya yang dilakukan oleh seorang operator atau penjaga air tersebut adalah menutup katup/valve, sehingga yang akan terjadi adalah ketinggian air yang sebenarnya akan naik seiring dengan mengalirnya air dari Q_{in}.

Tampak bahwa katup tersebut seperti kran air yang bisa dibuka atau ditutup secara variabel, hubungannya dengan banyak sedikitnya volume air yang di alirkan keluar (Q_{out}). Yang terjadi adalah dari pengamatan seorang operator tersebut dengan mata yang melihat kedalaman air hingga sampai ke tindakan, yaitu menutup atau membuka valve. Bagaimana proses yang terjadi ? hal ini bisa dijelaskan sesuai Gambar 2.5. Masing-masing dari komponen tersebut yaitu mata, otak dan tangan bisa dijelaskan sebagai berikut :

a. Mata

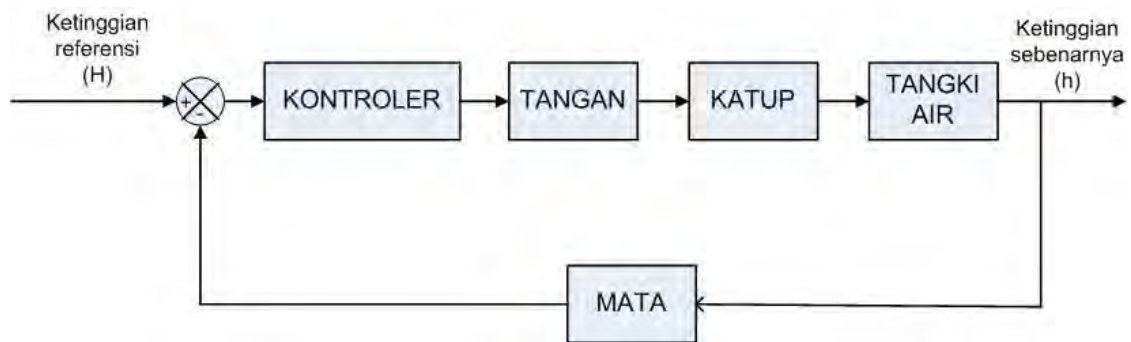
Berfungsi untuk mengawasi ketinggian level air.

b. Otak

Mempunyai 2 fungsi yaitu membandingkan level air yang sebenarnya dengan garis level referensi (A) dan kemudianmengambil keputusan yaitu :

- Jika level air sebenarnya melebihi tanda A, maka valve harus dibuka
- Jika level air sebenarnya kurang dari tanda A, maka valve ditutup.
- Jika level air sebenarnya sama dengan tanda A, maka valve dibiarkan (tidak ditutup dan tidak dibuka)

c. Tangan

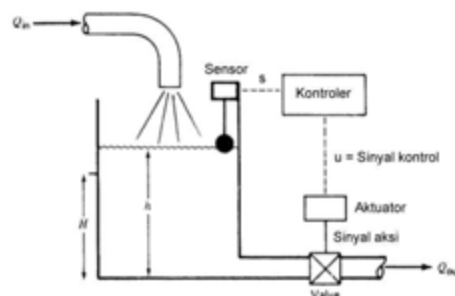
Berfungsi untuk membuka atau menutup valve.

Gambar 2.6 Blok Diagram Proses Kontrol pada Manusia

Dari blok diagram sesuai pada Gambar 2.6 bisa kita pahamibagaimana proses kontrol yangterjadi pada contoh *sistem control mempertahankan level air* di atas. Ketinggian referensi (*H*) dan Ketinggian sebenarnya (*h*) dibandingkan oleh pembanding (tanda +/-). Dimana ketinggian sebenarnya diamati oleh sepasang mata, kemudian tentunya sinyal dari mata menuju otak dikirim melalui *syaraf sensorik*. Dalam hal ini pembanding tadi berada di *otak*. Sehingga didapatkan sinyal *error* atau *kesalahan*. Nilai dari error ini bias bernilai positif, negatif ataukah nol.Kemudian oleh otak, diambil suatu keputusan sesuai dengan yang disebut di atas (ada 3 kemungkinan kondisi). Dalam hal ini fungsi otak sebagai kontroler. Sinyal kontrol yang dihasilkan oleh otak, dikirim melalui *syaraf motorik* ke tangan. Tentunya sinyal ini akan menyuruh tangan untuk membuka atau menutup katup pipa air yang keluar berdasarkan hasil keputusan dari otak sebagai fungsi kontroler. Karena dibuka atau ditutup katupnya, mengakibatkan ketingian level air tangki akan berubah, bisa semakn besar ataupun berkurang. Kemudian ketinggian air tersebut diamati oleh mata lagi yang kemudian dikirim ke otak,

dibandingkan dan diambil keputusan oleh otak. Dan regulasi ini terjadi secara terus-menerus.

Apa yang terjadi antara harapandan kenyataan ? tentunya akan terjadi kesalahan. Bagaimana jika tidak ada koreksi yang terjadi dari kesalahan yang ada, dalam hal ini tidak ada mata yang memperhatikan level dari ketinggian air. Tentunya kita akan berjalan didalam kebutaan, tidak tahu ketinggian level air sebenarnya (kenyataannya) berapa. Bisa saja yang terjadi adalah air terlalu sedikit atau air akan meluber karena terlalu banyak yang dialirkan. Disinilah diperlukan sistem kontrol yang lebih akurat, yaitu diperlukannya balikan dari keluaran/kenyataan yang dihasilkan (level ketinggian) yang harus dibandingkan dengan referensi (harapan) kita. Dan tentunya kontroler juga harus bisa mengambil keputusan dengan akurat dan benar sesuai dengan yang seharusnya. Seperti inilah sistem kontrol dengan loop tertutup itu bekerja. Konsep seperti ini berlaku pada setiap sistem control yang ada. Ada nilai referensi, pembanding, kontroler, aktuator, plant dan sensor. Istilah-istilah ini akandijelaskan di bagian selanjutnya.

3. Sistem Kontrol Otomatis

Sistem kontrol otomatis adalah sistem kontrol umpan balik dengan acuan masukan atau keluaran yang dikehendaki dapat konstan atau berubah secara perlahan dengan berjalannya waktu dan tugas utamanya adalah menjaga keluaran sebenarnya berada pada nilai yang dikehendaki dengan adanya gangguan.

Gambar 2.7 Sistem Kontrol Level Air secara Otomatis

Pemakaian sistem control otomatis dalam segala bidang keteknikan masa kini semakin banyak dipakai. Hal ini disebabkan sistem kontrol otomatis mempunyai banyak keunggulan dibandingkan dengan sistem kontrol konvensional (manual), yaitu dari segi kecepatan, ketepatan dan pemakaian tenaga manusia yang relatif lebih sedikit. Apalagi ditunjang dengan pengembangan dunia elektronika, pneumatika maupun hidrolik. Banyak contoh sistem control otomatis, beberapa di antaranya adalah kontrol suhu ruangan mobil secara otomatis, pengatur otomatis tegangan pada *plant* daya listrik di tengah-tengah adanya variasi beban daya listrik, dan kontrol otomatis tekanan dan suhu dari proses kimiawi. Dalam sistem control otomatis, terdapat elemen-elemen penyusun, yaitu :

a. Sensor/Tranduser

Sensor adalah suatu komponen yang mendeteksi keluaran atau informasi lainnya yang diperlukan dalam siste kontrol. Sedangkan tranduser adalah suatu komponen yang mampu merubah besaranbesaran non listrik (mekanis, kimia atau yang lainnya) menjadi besaranbesaran listrik atau sebaliknya.

b. Kontroler

Kontroler adalah suatu komponen, alat, atau peralatan (berupa mekanis, pneumatik, hidrolik, elektronik atau gabungan darinya) yang mampu mengolah data masukan dari membandingkan respon plant (hasil pembacaan dari keluaran plant) dan referensi yang dikehendaki untuk dikeluarkan menjadi suatu data perintah atau disebut *sinyal kontrol*.

c. Aktuator

Aktuator adalah suatu komponen, alat atau peralatan (berupa mekanis, pneumatik, hidrolik, elektronik atau gabungan dari hal tersebut) yang mampu mengolah data perintah (sinyal kontrol) menjadi sinyal aksi ke suatu plant. Untuk lebih mudah memahami cara kerja sistem kontrol otomatis, pada Gambar 2.7 diberikan contoh sistem kontrol secara otomatis pada aplikasi kontrol level air. Pada bagian ini sudah tidak menggunakan seorang operator manusia lagi untuk mempertahankan level air sesuai

yang diinginkan, tetapi sudah menggunakan kontroler yang bekerja secara otomatis, berupa bahan pelampung dan tambahan komponen elektronik. Dengan komponen ini bisa diketahui berapa kedalaman atau ketinggian level air yang sebenarnya. Dari besaran fisika, yaitu kedalaman/ketinggian dengan satuan meter dirubah menjadi besaran listrik dengan satuan tegangan. Dengan adanya informasi ini, maka kontroler akan menghasilkan sinyal kontrol yang diolah sebelumnya. Kontroler bias berupa rangkaian elektronik, mikrokontroler, mekanis, pneumatik, hidrolik ataupun gabungan dari nya. Karena sinyal kontrol tidak bisalangsung dimanfaatkan untuk memutar katup/valve pipa, makasinyal ini harus dikonversi dulu menjadi sinyal aksi. Aktuatorlah yang mengkonversi sinyal ini. Aktuator dalam sistem ini bisa berupa motor listrik, komponen pneumatika atau komponen hidrolik.

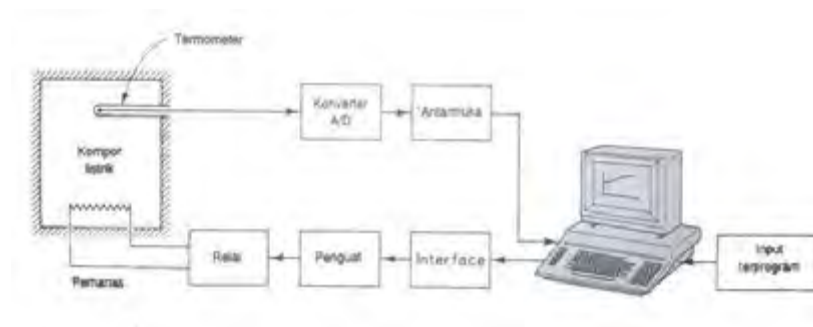
4. Ilustrasi Sistem Kontrol

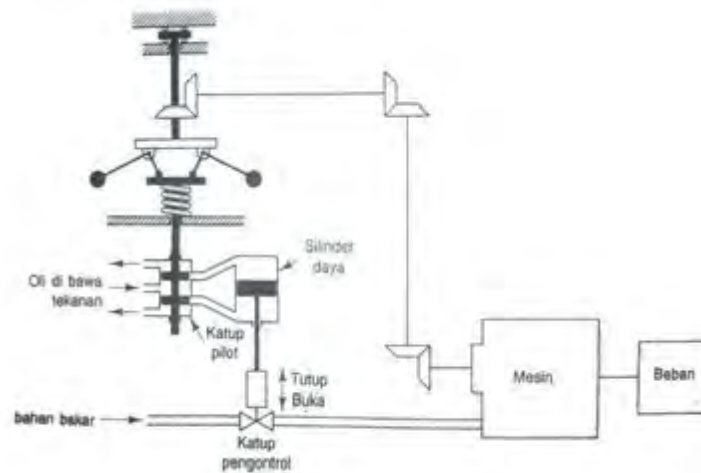
Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai beberapa contoh ilustrasisistem kontrol terbuka dan sistem kontrol tertutup.

4.1 Sistem Kontrol Kecepatan

Governor Watt Prinsip dasar dari governor Watt untuk mesin dilukiskan dengan diagram skematik pada gambar 9.8. Besarnya laju aliran bahan bakar yang masuk ke silinder mesin diatur sesuai dengan selisih antara kecepatan mesin yang diinginkan dan kecepatan mesin yang sebenamya. Kecepatan governor diatur sesuai dengan kecepatan yang diinginkan. Kecepatan yang sebenarnya turun di bawah harga yang diinginkan, maka gaya sentrifugal *governor kecepatan* menjadi semakin mengecil, menyebabkan katup pengontrol bergerak ke bawah, mencatu bahan bakar yang lebih banyak sehingga kecepatan mesin membesar sampai dicapai harga yang diinginkan. Sebaliknya, jika kecepatan mesin melebihi nilai yang diinginkan, maka gaya sentrifugal dari *governor kecepatan* semakin membesar, maka menyebabkan katup pengontrol bergerak ke atas. Hal ini akan memperkecil catu bahan bakar sehingga kecepatan mesin mengecilsampai dicapai nilai yang diinginkan.

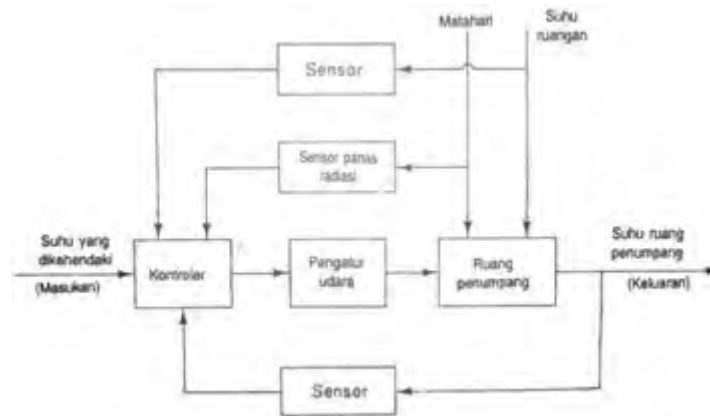
Pada sistem kontrol kecepatan ini, *plant* (sistem yang dikontrol) adalah mesin dan variabel yang dikontrol adalah kecepatan dari mesin tersebut. Perbedaan antara kecepatan yang dikehendaki dan kecepatan sebenarnya adalah sinyal, kesalahan. Sinyal kontrol (jumlah bahan bakar) yang akan diterapkan ke *plant* (mesin) adalah sinyal aktuasi. Masukan eksternal yang akan mengganggu variabel yangdikontrol adalah gangguan. Perubahan beban yang tidak diharapkan adalah gangguan.

4.2 Sistem Kontrol Suhu

Gambar 2.8 Sistem Kontrol Suhu mobil

Gambar 2.8 menunjukkan diagram kontrol suhu dari kompor listrik. Suhu tersebut diukur oleh sensor suhu (komponen yang menghasilkan sinyal analog). Besaran tegangan suhu dalam bentuk sinyal analog dikonversi menjadi besaran digital oleh konverter A/D. Suhu digital tersebut dimasukkan ke kontroler melalui sebuah antarmuka. Suhu digital ini dibandingkan dengan suhu masukan yang diprogram, dan jika terdapat penyimpangan (kesalahan), kontroler mengirim sinyal ke pemanas melalui sebuah antar muka penguat dan relai, untuk membawa suhu kompor ke nilai yang dikehendaki.

Gambar 2.9 Fungsi kontrol suhu dari ruang penumpang

4.3 Sistem Kontrol Suhu Ruang Penumpang Mobil

Gambar 2.9 menunjukkan fungsi kontrol suhu dari ruang penumpang mobil. Suhu yang dikehendaki, dikonversi menjadi tegangan, adalah masukan ke kontroler. Suhu sesungguhnya dari ruang penumpang dikonversikan ke tegangan melalui sensor/tranduser dan dimasukkan kembali ke kontroler untuk perbandingan dengan masukan. Suhu ruangan dan alih panas radiasi dari matahari, bertindak sebagai gangguan. Sistem ini menggunakan baik kontrol umpan balik maupunkontrol umpan ke depan. (Kontrolumpan ke depan memberikan aksikoreksi sebelum gangguan mempengaruhi keluaran). Suhu ruang penumpang mobil berbeda cukup besar tergantung pada tempat di mana ia diukur. Daripada menggunakan banyak sensor untuk pengukuran suhu dan meratakan nilai yang diukur, adalah lebih ekonomis memasang penghisap atau penghembus di tempat di mana penumpang biasanya merasakan suhu. Suhu udara dari penghisap atau penghembus adalah petunjuk suhu ruang penumpang (keluaran sistem).

Kontroler menerima sinyal masukan, sinyal keluaran dan sinyal dari sensor sumber gangguan. Kontroler mengirimkan sinyal control optimal ke alat pengatur udara (*air conditioner*) untuk mengontrol jumlah udara penyejuk sedemikian rupa sehingga ruang penumpang sama dengan suhu yang dikehendaki.

Gambar 2.10 Sistem Kontrol Suhu di Ruang Penumpang Mobil

4.4 Sistem Pengontrolan Lalu Lintas

Pengontrolan lalu-lintas dengan sinyal lalu-lintas yang dioperasikan pada basis waktu membentuk sebuah sistem kontrol loop terbuka. Meskipun demikian, jika jumlah mobil yang menunggu di setiap sinyal lalu lintas pada suatu daerah yang ramai sekali, pada suatu kota, diukur secara kontinyu dan informasinya dikirim ke pusat komputer yang mengontrol sinyal-sinyal lalu lintas, maka sistem semacam itu menjadi loop tertutup.

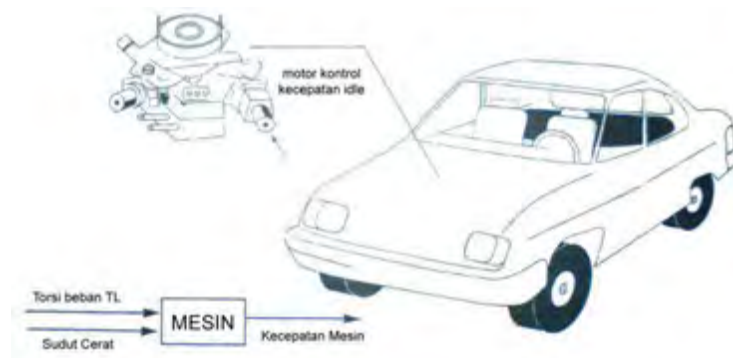
Pergerakan lalu lintas dalam jaringan adalah cukup kompleks karena variasi dari volume lalu-lintas sangat bergantung pada jam dan hari

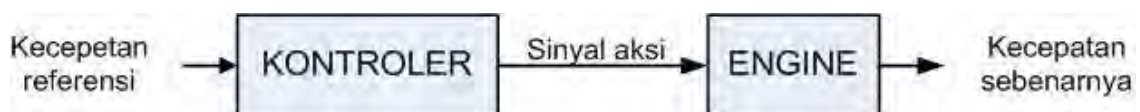
dalam satu minggu, maupun pada beberapa faktor yang lain. Dalam beberapa hal, distribusi Poisson dapat diterapkan untuk kedatangan pada persimpangan, tetapi hal ini tidak perlu berlaku untuk semuapersoalan lalu lintas. Pada kenyataannya, meminimkan waktu tunggu rata-rata adalah suatu persoalan kontrol yang sangat kompleks.

4.5 Sistem Kontrol Inventarisasi dan Sistem Bisnis

Pemrograman laju produksi dan tingkat persediaan barang di industry merupakan contoh lain dari sebuah sistem kontrol loop tertutup. Tingkat persediaan yang sebenarnya, yang merupakan keluaran sistem,

dibandingkan dengan tingkat persediaan yang diinginkan, yang dapat berubah dari waktu ke waktu sesuai dengan pasaran. Jika ada perbedaan antara tingkat persediaan yang sebenarnya dengan tingkat persediaan yang diinginkan, maka laju produksi distel sedemikian rupa sehingga keluaran selalu mendekati "level" yang diinginkan, yang dipilih untuk memaksimumkan keuntungan.

Sistem bisnis bisa terdiri dari beberapa grup yang masing-masing mempunyai tugas (elemen dinamik sistem). Metode umpan-balik untuk melaporkan prestasi tiap grup harus ditetapkan dalam sistem tersebut, agar beroperasi dengan baik. Kopling silang antara grup-grup fungsional harus dibuat dalam orde minimum, untuk mengurangi waktu tunda yang tidak diinginkan dalam sistem. Semakin kecil kopling silang maka akan semakin halus aliran sinyal kerja dan bahan.

Gambar 2.11 Sistem Kontrol Kemudi dan Kecepatan Idle pada Mobil

Sistem bisnis merupakan sistem loop tertutup. Disain yang bagus akan menyederhanakan kontrol manajerial yang diperlukan. Perhatikan bahwa gangguan pada sistem ini adalah cacat bahan atau manusia, interupsi komunikasi, kesalahan manusia, dan sejenisnya.

Gambar 2.12 Sistem Kecepatan Idle dengan Loop Terbuka

Penentuan perkiraan sistem yang baik didasarkan pada statistik dan kekuasaan manajemen yang baik. (Perhatikan bahwa hal ini dikenal dari kenyataan bahwa unjuk kerja sistem dapat ditingkatkan dengan pengaturan waktu atau antisipasi).

5. Contoh Penerapan Sistem Kontrol

5.1 Kemudi Mobil

Sebagai Suatu contoh sederhana dari sistem kontrol terbuka, bias dilihat pada gambar 2.11, yaitu kontrol kemudi mobil. Arah dua roda depan dapat dianggap sebagai variabel yang dikendalikan atau keluaran (y) arah dari roda kemudi adalah sinyal penggerak atau masukan (u). Sistem kontrol kemudi mobil ini masih menggunakan sistem mekanis, karena memang unsure mekanis yang membentuk sistem kontrol ini.

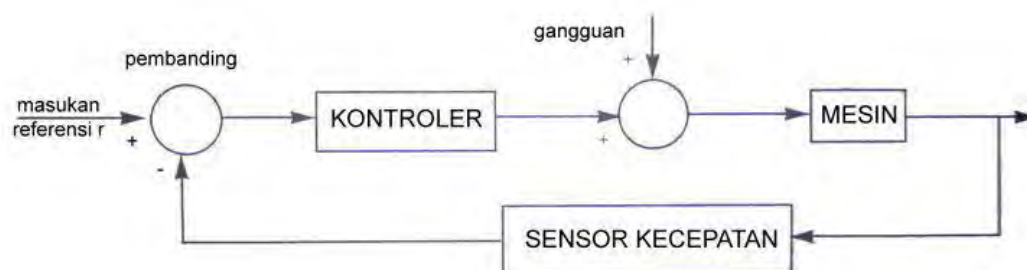
Sistem kontrol, atau proses pada masalah ini, terdiri dari mekanisme kemudi dan dinamika seluruh mobil. Walaupun demikian, jika tujuannya adalah untuk mengendalikan kecepatan mobil, maka besarnya tekanan yang dikerahkan pada pedal gas adalah sinyal penggerak, serta kecepatan kendaraan adalah variable yang dikendalikan. Secara keseluruhan, kita dapat menyatakan bahwa sistem kontrol mobil yang sederhana merupakan satu kesatuan dengan dua masukan (kemudi dan pedal gas) dan dua keluaran satu tujuan dan kecepatan.

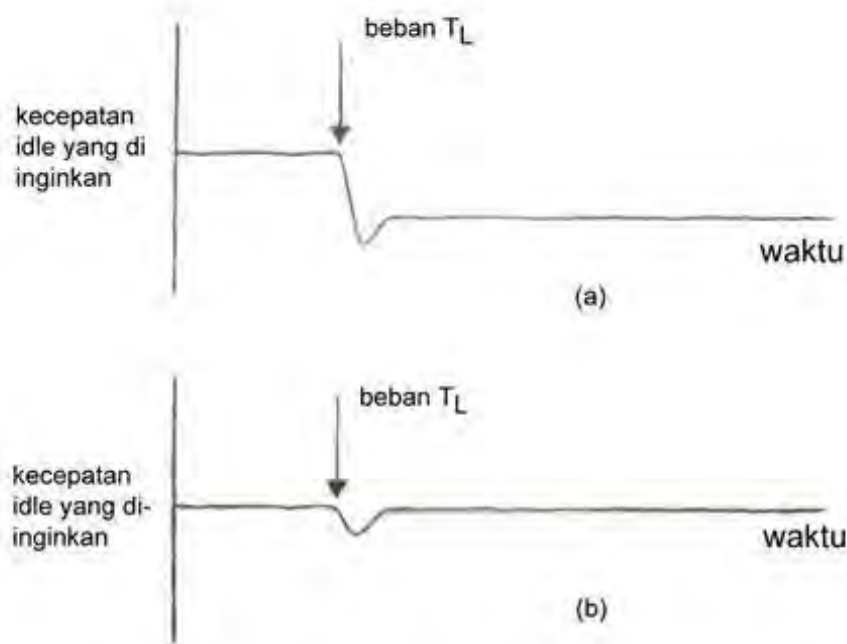
Dalam kasus ini, dua pengendaliandan dua keluaran tidak bergantung satu dengan yang lainnya, tetapi pada umumnya, terdapat sistem yang pengendaliannya saling berhubungan. Sistem dengan masukan dankeluaran lebih dari satu disebut sistem banyak variabel.

5.2 Sistem kontrol Kecepatan

Idle mobil loop terbuka Selain menggambarkan sistem kontrol kemudi, pada gambar 2.11 juga menggambarkan sistem control kecepatan idle dari satu mesin mobil. Sistem kontrol kecepatan idle mobil bisa dirancang dengan menggunakan dua jenis pengontrolan, yaitu dengan loop terbuka atau loop tertutup. Pada loop terbuka, tidak sulit untuk melihat bahwa sistem yang ditunjuk tersebut tidak akan memenuhi permintaan kinerja yang kritis. Misalnya, jika sudut katup

- ditentukan pada nilai awal tertentu, yang berhubungan dengan kecepatan tertentu, ketika suatu torsi beban *TL* diberikan, tidak bisa dihindari suatu penurunan pada kecepatan mesin. Satu-satunya cara untuk membuat sistem tetap bisa bekerja adalah dengan menyesuaikan
- sebagai reaksi terhadap perubahan torsi beban yang berguna untuk mempertahankan kecepatan mesin
- pada nilai yang diinginkan. Unsur sistem kontrol terbuka biasanya dibagi atas dua bagian yaitu kontroler dan proses yang dikontrol, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.

Suatu sinyal masukan atau perintah *r* diberikan ke kontroler, dimana keluarannya bertindak sebagai sinyal penggerak *u*. Sinyal penggerak tersebut kemudian mengendalikan plant yang dikendalikan sehingga variabel yang dikendalikan *y* akan dihasilkan sesuai dengan persyaratan yang telah ditentukan.

Gambar 2.13 Sistem Kecepatan Idle dengan Loop Tertutup

Dalam kasus sederhana, kontroler dapat berupa amplifier penguat), seperangkat alat mekanis atau kontroler lainnya tergantung jenis sistem. Dalam kasus yang lebih canggih lagi, kontroler dapat berupa komputer seperti mikroprosesor.

Gambar 2.14 Respon Sistem Kontrol Kecepatan
Idle Loop Terbuka dan Tertutup

Karena kesederhanaan dan sifat ekonomis dari sistem kontrol loop terbuka, banyak ditemukan model sistem ini pada aplikasi yang tidak memerlukan ketelitian yang besar. Tujuan dari sistem ini adalah menghilangkan atau meminimumkan penurunan kecepatan ketika beban mesin digunakan

6. Jenis Sistem Kontrol

Bagian ini membahas mengenai sistem kontrol mekanis, sistem kontrol pneumatik, sistem kontrol hidrolik dan sistem kontrol elektronik.

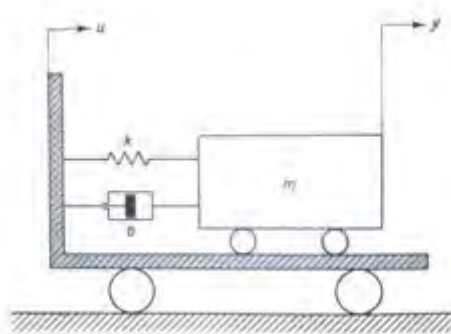
6.1 Sistem Kontrol Mekanis

Sistem kontrol mekanis merupakan suatu sistem kontrol yang menggunakan bahan-bahan mekanis sebagai kontrolernya. Hukum yang mendasari prinsip kerja kontroler secara mekanis adalah hukum kedua Newton, yaitu F = m x a , dimana :

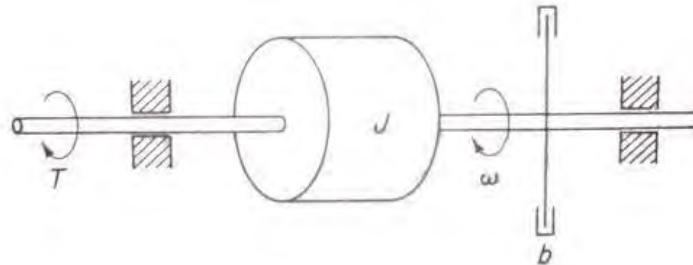
F = gaya (N)

m = massa (kg)

a = percepatan (m/s2)

Contoh sistem mekanis adalah sistem translasi mekanika dan sistem rotasi mekanika. Tinjau sistem *dashpot massa pegas* yang dipasang pada kereta seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.15. Dashpot adalah alat yang memberikan gesekan liat atau redaman. Ia terdiri dari sebuah torak dan silinder yang berisi minyak. Gerakan relatif apapun antara besi torak dan silinder ditahan oleh minyak, karena minyak tersebut

Gambar 2.15 Sistem dashpot-massapegas

yang dipasang di atas kereta harus mengalir di sekitar torak (ataumelalui lubang-lubang kecil yangterdapat pada torak) dari sisi yang satu ke sisi yang

lain dari torak. Pada dasarnya dashpot menyerap energi. Energi yang diserap tersebut dikeluarkan sebagai panas dan dashpot tidak menyimpan energy kinetik ataupun tegangan. Dashpot dinamakan juga peredam (*damper*).

Gambar 2.16 Sistem Rotasi Mekanika

yang diunjukkan dalam Gambar 2.16.Sistem terdiri dari beban inersia dan peredam gesekan liat. Untuk sistem rotasi mekanika demikian, maka Hukum Newton kedua menyatakan

$$T = Ja$$

Dimana T = torsi yang diterapkan ke sistem (Nm)

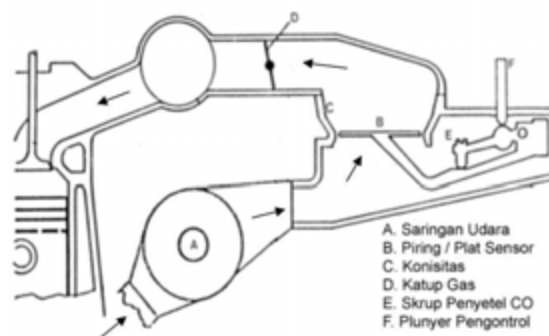
J = Momen Inersia dari beban (kgm2)

a = percepatan sudut dari beban (rad/s2)

Contoh di kendaraan adalah pada sistem kontrol pengaliran bahan bakar yang menggunakan sistem karburator dan injeksi K. Pada bagian ini proses kerja karburator tidak perlu di bahas. Siswa dianggap sudah memahami bagaimana prinsip kerjanya. Sistem kontrol pengaliran bahan bakar yang menggunakan injeksi K ini bisa dijelaskan sebagai berikut. Sama dengan prinsip yang ada di karburator, pada sistem injeksi K pada kendaraan berbahan bakar bensin, bahan bakar dikabutkansecara terus-menerus. Yangmembedakan adalah komponen yang digunakan. Pada sistem injeksi K, untuk menyemprotkan bahan bakar agar terbentuk kabut, digunakan injektor (komponen mekanis). Disini injektor menyemprot secara

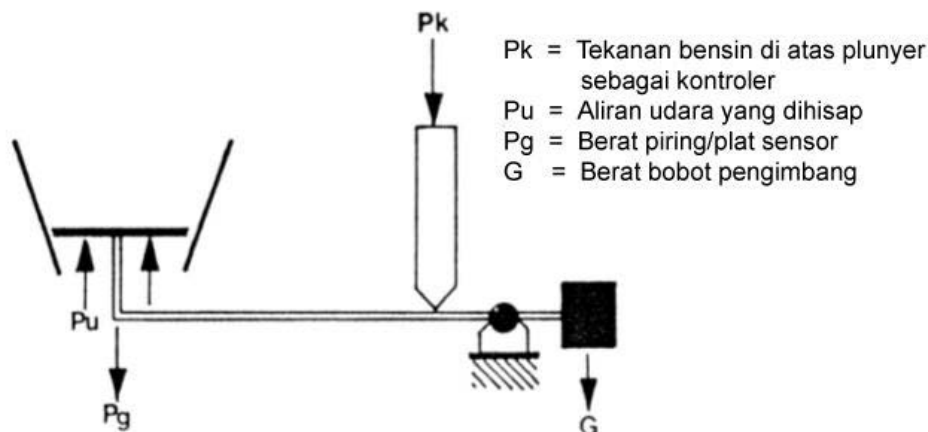
terusmenerus. Banyak sedikitnya bahan bakar yang disemprot, berdasarkan informasi yang diperoleh dari tekanan udara yang masuk. Semakin besar tekanan udara yang masuk, mengindikasikan bahwa massa udara yang terhisap di ruang bakar tentunya banyak. Agar didapatkan perbandingan yang ideal dari massa udara dan massa bahan bakar yang masuk ke ruang bakar, maka tentunya kontroler mekanis dari sistem K-Jetronik ini bisa mengatur berapa banyak bahan bakar yang disemprotkan melalui injektor.

Dengan perbandingan yang idealantara massa udara dan bahan bakar sebesar 2.7 : 1 akan didapatkan pembakaran yang sempurna. Hal ini yang menjadi masalah di semua sistem kontrol pengaliran bahan bakar, baik sistem karburator, KJetronik dan sistem kontrol pengaliran bahan bakar secara elektronik.

ada gambar 2.17, dipelihatkan sistem pengaliran bahan bakar K-Jetronik.

Gambar 2.17 Sistem Pengaliran bahan Bakar K-Jetroni

Ketika pedal gas diinjak oleh pengemudi, maka katup gas D akan semakin terbuka. Sebaliknya jikapedal gas sedikit penginjakannya oleh pengemudi maka katup gas sedikit pula terbukanya. Dengan semakin besar bukaan throtlle maka udara yang masuk akan semakin besar pula. Udara masuk melalui saringan udara A, dengan arah aliran udara sesuai dengan arah anakpanah. Setelah melalui saringan udara A, aliran udara menekan Piring/plat sensor B. Karena ada tekanan ini, maka plat sensor akan

terangkat ke atas yang akhirnya menyebabkan plunyer pengontrol bahan bakar juga terangkat ke atas.

Semakin besar tekanan udara yang masuk, maka semakin terangkat pula plat sensor yang akhirnya plunyer pengontrol juga semakin terangkat yang nantinya menyebabkan semakin banyak bahan bakar yang disemprotkan ke ruang bakar. Hal ini bisa diamati pada Gambar 2.18. Ketika tekanan udara kecil (tampak dengan tanda anak panah yang sedikit pada Gambar 2.17 (b)), maka plunyer pengontrol terangkat sedikit. Sehingga aliran bahan bakar (bensin) yang menuju ke injector terhambat dan sisanya dikembalikan lagi ke saluran menuju tangki bensin.

Gambar 2.18 Kontroler Mekanis pada Sistem K-Jetronik

Bahan bakar bensin dari tangki bensin mempunyai tekanan yang besar yang ditimbulkan oleh pompa di tangki bensin. Karena mempunyai tekanan yang besar tersebut, maka bahan bakar yang menuju injector tadi menyemprot hingga mengabut. Hanya saja karena sedikit yang diteruskan ke injektor tadi, maka tentunya pengkabutan bensin tadi sedikit pula yang menuju ke ruang bakar.

Hal ini berbeda dengan kondisi seperti yang terlihat di Gambar 2.18 (b). Dengan semakin besar tekanan udara yang masuk (tampak gambar

anak panah yang banyak), maka piring/plat sensor akan lebih terangkat ke atas. Hal ini mengakibatkan plunyer pengontrol semakin terangkat pula. Karena inilah, bahan bakar yang berada di saluran yang menuju injektor lebih banyak dari pada kondisi pada gambar 2.18 (b). Sehingga bahan bakar yang dikabutkan oleh injector karena adanya tekanan bensin yang besar di saluran semakin banyak yang terhisap oleh mesin. Selain dipengaruhi oleh tekanan udara, ada faktor lain yang mempengaruhi besar pengangkatan plunyer pengontrol. Hal ini bias dijelaskan dengan melihat Gambar 9.19. Tampak bahwa selain tekanan udara (Pu) ada juga faktor lain yang mempengaruhi seberapa besar plunyer pengontrol terangkat. Faktorfaktor tersebut adalah berat piring atau plat sensor (Pg) dan berat bobot pengimbang (G). Agar tercapai kesetimbangan maka Pu + G = Pg + Pk. Disinilah model matematik kontrolernya. Sehingga dari sini bias didapatkan besarnya keluaran kontroler (plunyer pengontrol), yaitu Pk = (Pu + G) – Pg. Ada dua kondisi yang bisa dijelaskan di sini, yaitu :

(pada kondisi pedal gas)

- Ketika Katup gas lebih menutup Dimana Pu + G < Pg + Pk, maka piring/plat sensor lebih menutup saluran masuk.
- Ketika Katup gas lebih membuka Pu + G > Pg + Pk, maka plat sensor lebih membuka saluran masuk.
- Faktor lain yang mempengaruhi aliran udara adalah bentuk konisitasnya (B pada Gambar 9.17). Dengan bentuk konisitas yang sedimikian rupa, maka aliran udara tersebut bisa terhambat atau mengalir lancar. Konisitas merupakan bentuk saluran. Sehingga dari penjelasan tersebut diatas dapat kitasimpulkansebagai berikut:
- Jumlah udara yang mengalir tergantung dari tinggi pengangkatan piring/plat sensor dan bentuk konisitasnya. Sesuai dengan pedal gas yang diinjak oleh seorang sopir.
- Jumlah bahan bakar yang diinjeksikan tergantung dari jumlah udara yang mengalir. Semain besar udara yang mengalir, maka semakin besar bahan bakar yang diinjeksikan. Sebaliknya semakin kecil udara yang mengalir maka semakin sedikit bahan baka yang diinjeksikan.

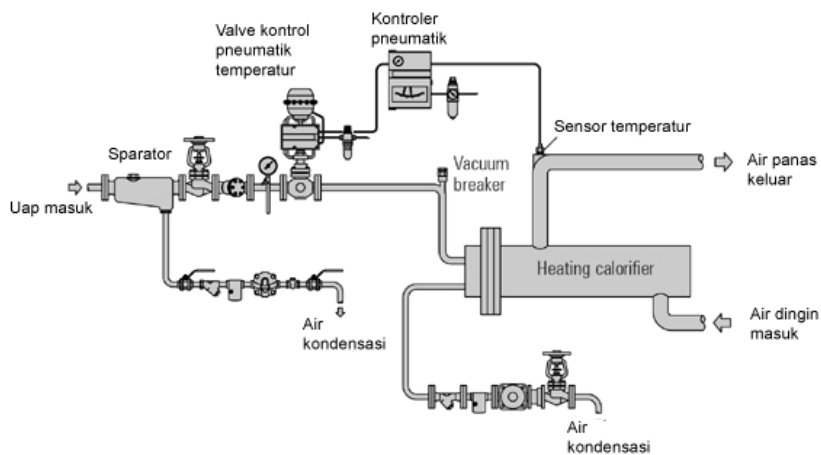
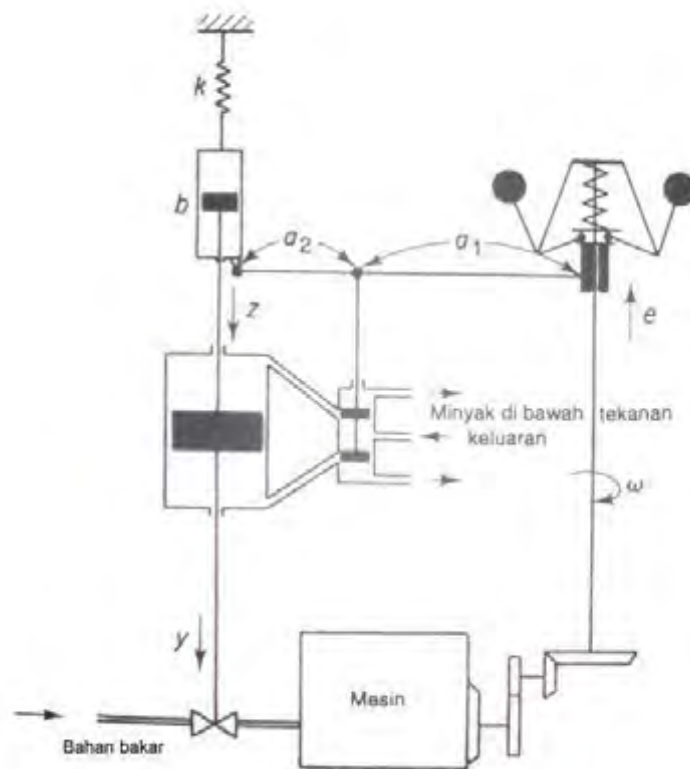
Dengan perhitungan yang sesuai, maka akan didapatkan perbandingan udara dan bahan bakar sebesar 14.7 : 1 di setiap kondisi bukaan katup gas. Dan hal ini yang diharapkan pada sistem kontrol pengaliran bahan bakar K-Jetronik.

6.2 Sistem Kontrol Pneumatik

Sebagai media yang paling berdaya guna untuk menyalurkan sinyal dan daya, fluida, baik dalam bentuk cairan ataupun gas, mempunyai banyak kegunaan dalam industri. Cairan dan gas pada dasamya dapat dibedakan oleh relative kemungkinan pemampatannya dan fakta bahwa cairan mungkin mempunyai permukaan yang bebas, sedang gas membesar memenuhi tempatnya. Dalam bidang rekayasa, istilah pneumatika menjelaskan sistem fluida yang menggunakan udara atau gas, dan hidrolika berlaku untuk sistem yang menggunakan minyak pelumas atau oli.

Sistem pneumatika digunakan secara ekstensif dalam otomatisasimesin-mesin produksi dan dalam biang kontroler otomatis. Misalnya, rangkaian pneumatika yang mengubah energi udara yang dimampatkan menjadi energy mekanika digunakan secara luas, dan berbagai jenis kontroler pneumatika ditemukan dalam industri. Karena sistem pneumatika dan sistem hidrolika sering saling dibandingkan, maka berikut ini kita akan memberikan perbandingan antara kedua sistem tersebut secara singkat. antara kedua sistem tersebut. Perbedaan-perbedaan tersebut adalah sebagai berikut :

1. Udara dan gas dapat dimampatkan sedang oli tidak dapat dimampatkan.
2. Udara kekurangan sifat pelumas dan selalu mengandung uap air. Fungsi oli adalah sebagai fluida hidrolika dan juga pelumas.
3. Tekanan operasi normal sistem pneummatika jauh lebih rendah daripada sistent hidrolika.
4. Daya keluaran sistem pneumatika jauh lebih kecil daripada sistem hidrolika.
5. Ketepatan aktuator pneumatika adalah buruk pada kecepatan rendah, sedangkan ketepatan aktuator hidrolika dapat dibuat memuaskan pada semua kondisi kecepatan.

6. Pada sistem pneumatika kebocoran eksternal diperbolehkan sampai tingkat tertentu, tetapi kebocoran internal harus dihindarkan karena perbedaan tekanan efektif agakkecil. Pada sistem hidrolika,kebocoran internal diperbolehkansampai tingkat tertentu, tetapikebocoran ekstemal harusdihindarkan.
7. Tidak diperlukan pipa kembali pada sistem pneumatika bila yang digunakan udara, sedang pipa kembali selalu diperlukan oleh sistem hidrolika.
8. Suhu operasi normal sistem pneumatika adalah 5° sampai 60°C (41° sampai 140oF). Namun sistem pneumatika dapat beroperasi pada suhu 0° sampai 200°C (32° sampai 392°F). Sistem pneumatika tidak peka terhadap perubahan suhu, tetapisebaliknva dengan sistem hidrolika, dengan gesekan fluida disebabkan oleh kecepatan yang bergantung besar sekali pada suhu. Suhu operasi normal untuk sistem hidrolika adalah 20° sampai 70°C (68° sampai 158°F).
9. Sistem pneumatika tahan api dan ledakan, sedang sistem hidrolika tidak demikian.

Gambar 2.19 (a) Sistem Kontrol Pneumatik Temperature

Gambar 2.19 (b) Sistem Kontrol Hidrolik (Kontrol Kecepatan Mesin)

6.3 Sistem Kontrol Hidrolik

Kecuali untuk kontroler pneumatic tekanan rendah, udara yang dimampatkan jarang digunakan untuk mengontrol kesinambungan gerakan alat-alat yang mempunyai massa. Perbandingan antara sistem pneumatika dan sistem hidrolika. Fluida yang umumnya ditemukan dalam sistem pneumatika adalah udara. Dalam sistem hidrolika, fluidanya adalah oh atau minyak pelumas. Perbedaan sifat-sifat fluida terutama menjadi karakteristik perbedaan yang berarti di bawah Raya beban eksternal. Untuk kasus demikian, kontroler hidrolika umumnya lebih dikehendaki. Penggunaan yang meluas dari rangkaian hidrolika dalam aplikasi alat-alat bantu mesin, sistem control pesawat terbang, dan operasi yang mirip dengan itu terjadi karena faktorfaktor seperti sifatnya yang positif, ketepatan, fleksibilitas, perbandingan daya kuda-berat yang tinggi, start yang cepat, berhenti dan ke belakang dengan lancar dan presisi, dan kesederhanaan operasinya.

Tekanan operasi dalam sistem hidrolika sekitar 145 dan 5000 lb/in2 (antara 1 dan 35 MPa). Dalam beberapa aplikasi khusus, tekananoperasi mungkin sampai 10.000 lbf/in2 (70 MPa). Untuk persyaratan daya yang sama, berat dan ukuran dari unit hidrolika dapat dibuat lebih kecil dengan meningkatkan tekanan pasokan. Pada sistem hidrolika tekanan tinggi, gaya yang sangat besar dapat diperoleh. Aksi yang

cepat, peletakan posisi yang tepat dari beban yang berat dimungkinkan dengan sistem hidrolika. Kombinasi sistem elektronika dan hidrolika digunakan secara luas, karena ia kelebihankelebihan baik dari kontrol elektronika maupun daya hidrolika. Terdapat kelebihan dan kekurangan tertentu dal dibandingkan dengan sistem lain.

Beberapa kelebihan-kelebihannya adalah:

1. Fluida hidrolika bertindak sebagai pelumas, disamping membawa pergi panas yang dihasilkan dalam sistem ke tempat pertukaran panas yang baik (*convenient heat exchanger).*
2. Aktuator hirdolika yang secara perbandingan ukurannya kecil dapat mengembangkan gaya dan torsi yang besar.
3. Aktuator hidrolika mempunyai kecepatan tanggapan yang lebih tinggi dengan start, stop, dan kecepatan kebalikan yang cepat.
4. Aktuator hidrolika dapat dioperasikan di bawah keadaan berkesinambungan, terputusputus (*intermittent*), kebalikan, dan melambat tanpa mengalami kerusakan.
5. Tersedianya aktuator balik linear maupun putar memberikan fleksibilitas dalam desain.
6. Karena kebocoran yang rendah dalam aktuator hidrolika, maka kecepatan akan jatuh bila beban yang diterapkan kecil.

Di lain pihak, beberapa kekurangan cenderung membatasi penggunaanya :

1. Daya hidrolika tidak siap tersedia dibandingkan dengan daya listrik.
2. Biaya sistem hidrolika mungkin lebih tinggi daripada sistem listrik yang sebanding dan mengerjakan fungsi yang mirip.
3. Bahaya api dan ledakan ada, kecuall jika menggunakan fluida tahan api.

4. Karena sukar sekali merawat sistem hidrolika yang bebas dari kebocoran, maka sistem tersebut cenderung kotor.
5. Oli yang terkontaminasi mungkin menyebabkan kegagalan sistem hidrolika untuk fungsi dengan benar.
6. Sebagai hasil dari karakteristik non linear dan karakteristik rumit lainnya, maka desain dari sistem hidrolika yang canggih sangat memerlukan waktu dan usaha yang besar.
7. Rangkaian hidrolika umumnya mempunyai karakteristik redaman yang buruk. Jika rangkaian hidrolika tidak didesain dengan benar, maka beberapa fenomena yang tidak stabil mungkin terjadi atau hilang, tergantung pada keadaan operasi.

6.4 Sistem Kontrol Elektronik

Pada sistem kontrol elektronik, kontroler yang digunakan merupakan suatu unit yang terdiri dari komponen elektronika. Unit elektronika disini merupakan rangkaian yang terintegrasi dari banyak komponen elektronika, yaitu resistor, kapasitor, induktor, dioda, transistor, op-amp, IC dan masih banyak komponen elektronika yang lain. Unit elektronika tersebut, bisa berupa rangkaian yang sederhana maupun rangkaian yang kompleks. Salah satu komponen elektronika yang bisa dijadikan sebagai kontroler adalah potensiometer. Dengan komponen ini, sudah bisa mengolah sinyal tegangan, yaitu sebagai pelemah, tidak bisa digunakan untuk menguatkan suatu sinyal, tentu saja harus digunakan komponen aktif, misalnya adalah op-amp. Apabila kita dapatkan selisih dari nilai referensi dan dari output plant (sinyal kesalahan/error) dan ternyata jenis kontroler yang diperlukan adalah pelemahan sinyal, maka dengan potensiometer tadi sudah bisa kita terapkan untuk membuat kontroler ini. Kontroler ini disebut *kontroler proposional*.

Lebih canggih lagi, komponen elektronik yang dijadikan sebagai kontroler adalah yang menggunakan mikroprosesor. Disini sudah digunakan teknologi digital. Beberapa tahun belakangan ini, teknologi digital sangat berkembang pesat. Baik yang tanpa menggunakan program atau yang memerlukan program. Mikro prosesor merupakan komponen elektronik

yang memerlukan program agar bisa bekerja. Dengan program, maka bisa digunakan untuk berbagai aplikasi berdasarkan logika pemikiran dari seorang programmer dan perancang aplikasi tersebut.

Di dunia otomotif, ada suatu unit elektronik yang menggunakan mikroprosesor, berfungsi untuk mengatur jumlah bahan bakar dan mengatur waktu penyalaan pengapian. Unit ini disebut sebagai ECU (*Electonic Control Unit*). Ada banyak fungsi ECU yang lain di kendaraan. Ada yang digunakakan untuk EPS (*Electronic Power Steering*), ABS (*Antilock Brake System*), *Airbag System*, AC (*Air Conditioning*), *Automatic Transmission* dan masih banyak sistem kontrol yang lain di kendaraan

7. Topologi Sistem Kontrol Elektronik

Pada sistem kontrol elektronik, ada beberapa komponen-komponen yang digunakan, yaitu sensor, pengkondisian sinyal, mikroprosesor dan mikrokontroler, memori, driver dan aktuator. Masing-masing komponen ini bisa djelaskan di bawah ini.

Gambar 2.20 *Electronic Control Unit*(ECU)

7.1 Sensor

Sensor adalah piranti atau komponen yang digunakan untuk merubah suatu besaran non listrik (fisika maupun kimia) menjadi besaran listrik sehingga dapat dianalisa dengan rangkaian listrik tertentu. Ada beberapa

istilah yang perlu diperhatikan, yaitu kesalahan (*error*), akurasi (*accuracy*), sensitivitas (*sensitivity*), repeabilitas (*repeability*), histerisis (*hysterisis*), linearitas (*linearity*). Istilah kesalahan (*error*) didefinisikan sebagai perbedaan antara nilai variabel yang sebenarnya dan nilai pengukuran variabel.

Seringkali nilai sebenarnya tidak diketahui. Untuk kasus tertentu, akurasi akan menunjukkan range/bound kemungkinan dari nilai sebenarnya. Istilah akurasi (*accuracy*) digunakan untuk menentukan kesaahan (*error*) keseluruhan maksimum yang diharapkan dari suatu alat dalam pengukuran. Ada beberapa jenis akurasi, yaitu :

1. Terhadap variabel yang diukur

Misalnya akurasi dalam pengukuran suhu ialah 2oC, berarti ada ketidak akuratan(uncertainty) sebesar 2oC pada setiap nilai suhu yang diukur.

2. Terhadap prosentase dari pembacaan Full Scale suatu instrumen

Misalnya akurasi sebesar 0.5% FS (Full Scale) pada meter dengan 5 V Full Scale, berarti ketidakakuratan pada sebesar 0.025 volt.

3. Terhadap prosentase span (rangekemampuan pengukuran instrumen)

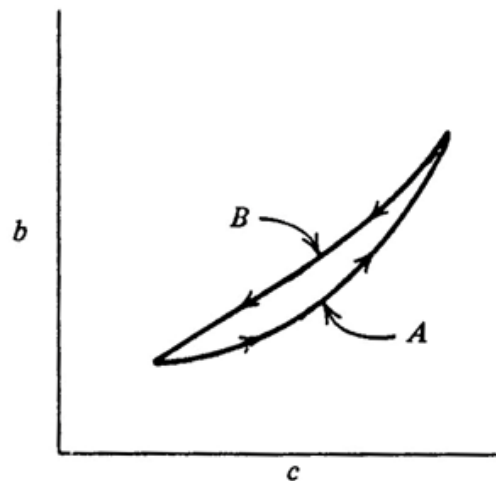
Misalnya jika sebuah alat mengukur 3% dari span untuk pengukuran tekanan dengan range 20 - 50 psi, maka akurasinya menjadi sebesar (0.03) (50 – 20) = 0.9 psi.

Istilah sensitivitas (*sensitivity*) didefinisikan sebagai perubahan pada output instrumen untuk setiap perubahan input terkecil. Sensitivitas yang tinggi sangat diinginkan karena jika perubahan output yang besar terjadi saat dikenai input yang kecil, maka pengukuran akan semakin mudah dilakukan. Misalnya, jika sensitivitas sensor temperatur sebesar 5 mV/oC berarti setiap perubahan input 1oC akan muncul output sebesar 5 mV.

Istilah repeabilitas (*repeability*) didefinisikan sebagai pengukuran terhadap seberapa baik output yang dihasilkan ketika diberikan input yang

sama beberapa kali.

$$repeatibility = \frac{max - min}{fullscale} x100\%$$

Istilah histerisis (*hysterisis*) didefinisikan sebagai perbedaan output yang terjadi antara pemberian input menaik dan pemberian input menurun dengan besar nilai input sama. Merupakan salah satu indikator repeatabilitas

Gambar 2.21 Grafik Histerisis

Istilah linearitas (*linearity*) didefinisikan sebagai hubungan antara output dan input dapat diwujudkan dalam persamaan garis lurus. Linearitas sangat diinginkan karena segala perhitungan dapat dilakukan dengan mudah jika sensor dapat diwujudkan dalam persamaan garis lurus.

Dalam pemilihan dan penggunaan suatu sensor, diperlukan pertimbangan-pertimbangan, agar sesuai dengan yang diharapkan. Pertimbangan-pertimbangan tersebut meliputi :

1. Identifikasi sinyal yang sebenarnya.

Tahap ini meliputi nilai nominal dan range pengukuran sensor, kondisi fisik lingkungan dimana pengukuran dilakukan, kecepatan pengukuran yang diperlukan, dan lain-lain.

2. Identifikasi sinyal output yang dibutuhkan.

   Kebanyakan output yang dihasilkan sebesar arus standar 4 – 20 mA (contoh pada sensor temperatur) atau tegangan yang besarnya diskalakan untuk mewakili range pengukuran sensor. Mungkin ada kebutuhan lain sepertai isolasi impedansioutput, dan lain-lain. Dalam beberapa kasus mungkin diperlukan konversi secara digital pada output.

3. Memilih sensor yang tepat.

   Berdasar langkah pertama, kita pilih sensor yang sesuai dengan spesifikasi range dan lingkungan. Selanjutnya, harga dan ketersediaan sensor juga harus dipertimbangkan.

4. Mendesain pengkondisi sinyal yang sesuai.

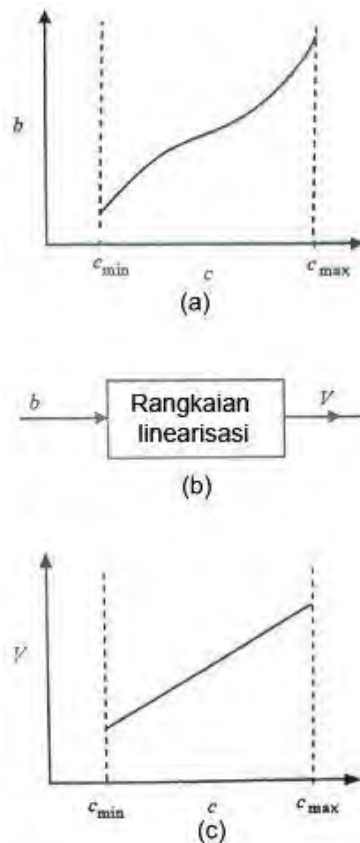
   Dengan pengkondisi sinyal, output dari sensor akan diubah menjadi bentuk sinyal output yang kita perlukan.

Sensor dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu sensor fisika dan sensor kimia. Sensor fisika mendeteksi besaran suatu besaran berdasarkan hukum-hukum fisika. Contoh sensor fisika adalah sensor cahaya, sensor suara, sensor kimia,sensor gaya, sensor kecepatan, dan sensor percepatan, dan sensor suhu. Sedangkan Sensor kimia mendeteksi jumlah suatu zat kimia dengan cara mengubah besaran kimia menjadi besaran listrik. Biasanya melibatkan beberapa reaksi kimia. Contoh sensor kimia adalah sensor pH, sensor Oksigen, sensor ledakan, dan sensor gas. Ada penggolongan lain berdasarkan keperluan dari sumber energi, yaitu sensor pasif dan sensor aktif. Untuk mengkonversi sifat-sifat fisik atau kimia ke besaran listrik sensor pasif tidak memerlukanbantuan sumber energi, contohnya adalah termocouple. Termocouple menghasilkan tegangan output sebanding dengan suhu pada sambungan termcouple tersebut.

Berbeda dengan sensor aktif, untuk mengkonversi sifat-sifat fisik atau kimia ke besaran listrik sensor aktif ini memerlukan bantuan sumber energi. Ada 6 tipe isyarat penggolongan sensor, yaitu :

1. *Mechanical*, contoh : panjang, luas, mass flow, gaya, torque, tekanan, kecepatan, percepatan, panjang gel acoustic dan lain lain.
2. *Thermal*, contoh : temperature, panas, entropy, heat flow dan lain-lain.
3. *Electrical*, contoh : tegangan, arus, muatan, resistance, frekuensi dan lain-lain.
4. *Magnetic*, contoh : intensitas medan, flux density dan lain-lain.
5. *Radiant*, contoh : intensitas, panjang gelombang, polarisasi dan lain-lain.
6. *Chemical*, contoh : komposisi, konsentrasi, pH, kecepatan reaksi dan lain-lain.

7.2 Pengkodisian Sinyal (*Signal Conditioning*)

Pengkondisi sinyal merupakan suatu operasi elektronik untuk mengkonversi sinyal tersebut menjadi sinyal yang sesuai dengan komponen elektronik lain yang diperlukan di dalam sistem kontrol. Pengkondisian sinyal dibagi menjadi dua bagian, yaitu pengkondisi sinyal secara analog dan secara digital. Pengkondisian secara analog menghasilkan sinyal keluaran yang masih merepresentasikan sinyal analog yang variabel. Pada aplikasi pemrosesan digital, beberapa pengkondisi sinyal analog tertentu dilakukan sebelum konversi analog ke digital dikerjakan.

Gambar 2.22 Linearisasi pada Sinyal yang Tidak Linear

8. Pengkondisian Sinyal Analog (*Analog Signal Conditioning*)

Sebuah sensor menghasilkannilai variabel dalam besaran listrik setelah melewati proses konversi. Tentunya besar sinyal ini bergantung terhadap karakteristik materialnya. Agar sinyal yang dihasilkan oleh sebuah sensor sesuai dengan yang diinginkan maka kita harus mengkonversinya setelah didapatkan keluarannya. Kita tidak bisa merubah karakteristik material didalamnya, karena tentunya sensor tersebut sudah menjadi satu kesatuan yang terintegrasi. Hanya industri pembuat sensor tersebut yang mampu merubahnya, karena kita hanya sebagai pemakai sensor tersebut dan bukan kita sendiri yang membuatnya. Sehingga hanya ada pilihan yang sedikit untuk kita terapkan ke sistem kontrol nantinya. Sebagai contoh adalah *cadmium sulfida* mempunyai nilai resistansi yang bervariasi yang berkebalikan dan tidak linear berdasarkan intensitas cahaya. Pengkondisi sinyal secara analog diperlukan dalam kasus ini untuk merubah sinyal yang

dihasilkan tersebut untuk dihubungkan dengan komponen lain dalam sisten kontrol. Tentunya konversi ini dilakukan secara elektris. Kita sering menguraikan bahwa akibat dari pengkondisian sinyal membentuk suatu transfer fungsi tertentu. Dengan rangkaian penguat tegangan yang sederhana, ketika diberi masukan tegangan pada rangkaian tersebut, maka memberikan tegangan keluaran. Hal ini memungkinkan membagi rangkaian pengkondisi sinyal secara umum sebagai berikut :

a. Merubah level sinyal

Metode yang sederhana pada rangkaian pengkondisi sinyal adalah merubah level atau nilai dari sinyal tersebut. Contoh yang sering dipakai adalah penguatan (*amplifier*) dan pelemahan (*attenuate*) level tegangan. Secara umum, aplikasi sistem kontrol dengan sinyal dc atau frekuensi rendah dapat dikuatkan dengan mudah. Faktor penting untuk memilih rangkaian penguatan adalah impedansi input dari keluaran sensor. Dalam sistem kontrol, sinyal selalu menggambarkan variabel proses (atau keluaran sistem) yang nantinya akan dibandingkan dengan nilai variabel (nilai referensi) untuk diolah oleh kontroler. Dalam beberapa kasus respon frekuensi dalam rangkaian penguatan sangat penting untuk diperhatikan, contohnya pada sensor *accelerometer* dan *optical detector*.

b. Linearisasi

Sesuai dengan penjelasan sebelumnya, bahwa pembuat sistem kontrol mempunyai pilihan yang sedikit dari karakteristik keluaran sensor terhadap variabel proses. Seringkali hubungan antara masukan dan keluaran dari sensor adalah tidak linear. Bahkan sensor yang mendekati linearpun juga bisa menjadi masalah ketika pengukuran yang presisi dari variabel sinyal diperlukan. Menurut sejarah, rangkaian analog dikhususkan pada penggunaan sinyal yang linear. Sebagai contoh, diperkirakan keluaran dari sebuah sensor bervariasi dan tidak linear dengan variabel proses. Ditunjukkan pada Gambar 9.23 (a). Rangkaian linearisasi di buat blok diagram ditunjukkan pada Gambar 9.23 (b), kondisi yang ideal, yaitu hubungan yang linear dari keluaran sensor yang

berupa tegangan dan variabel proses didapatkan, seperti terlihat pada Gambar 2.23 (c). Rangkaian seperti itu sulit untuk mendesainnya dan biasanya operasi daerah kerjanyadibatasi.Pendekatan modern untuk masalah ini adalah menjadikan sinyal yang tidak linea ersebut sebagai masukan dari sebuah komputer dan membentuk linearisasi dengan menggunakan software. Secara virtual, banyak ketidaklinearan dapat diatasi dengan cara ini dengan komputer modern yang cepat pemrosesannya secara *real time*.

c. Konversi

Seringkali pengkondisi sinyal digunakan untuk mengkonversi dari besaran listrik yang satu ke besaran listrik yang lain. Sebagian besar dari kelompok sensor/tranduser, memperlihatkan perlunya merubah resistensinya dengan variabel yang dinamis. Dalam kasus ini, perlu disediakan rangkaian untuk mengkonversi resitansi tersebut menjadi sinyal tegangan (Volt) atau sinyal arus (Ampere). Hal ini biasanya bisa terpenuhi oleh rangkaian jembatan saat perubahan resistansinya kecil dan/atau dengan rangkaian penguat (*amplifier*) dengan variasi penguatannya. Tipe penting dari suatu pengkonversian dihubungkan dengan kontrol proses yang standar dari sinyal yang ditransmisikan berupa level arus sebesar 4-20 mA pada kabel. Hal ini memerlukan pengkonversian resistansi dan level tegangan menjadi level arus yang diperlukan pada akhir pengiriman sinyal dan untuk pengkonversian balik dari arus menjadi tegangan pada akhir penerimaan sinyal yang dikirim. Tentunya pengiriman sinyal (*signal transmission*) dengan arus dipakai karena sinyal tidak bergantung dengan beban yang bervariasi. Dengan begitu, maka diperlukan perubah tegangan ke arus dan perubah arus ke tegangan. mikrokomputer dalam sistem kontrol memerlukan pengkonversian data analog menjadi data digital (digital interfacing) oleh rangkaian yang terintegrasi. Rangkaian ini disebut *Analog to Digital Converter* (ADC). Konversi sinyal analog biasanya diperlukan untuk mengatur sinyal analog yang diukur agar sesuai menjadi sinyal digital yang diperlukan sebagai masukan ADC. Sebagai contoh, ADC memerlukan sinyal masukan yang bervariasi antara 0 sampai dengan 5

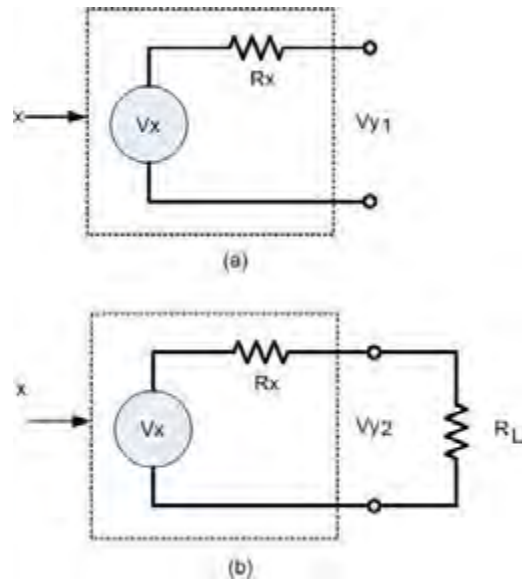
Volt, tetapi sensor memberikan sinyal yang bervariasi antara 30 sampai dengan 80 mV. Rangkaian pengkonversi sinyal tersebut dapat dibuat untuk menghubungkan keluaran sensor tersebut ke masukan ADC yang diperlukan.

d. Filter dan Penyesuaian Impedansi

Ada dua pengkondisi sinyal bersama lainnya yang diperlukan, yaitu proses pemfilteran (*filtering*) dan penyesuaian impedansi (*matching impedance*). Seringkali sinyal informasi yang sering dijumpai di dunia ind ustri sekarang ini mempunyai frekuensi 60 Hz. Motor listrik sewaktu di start, menyebabkan sinyal *pulse* dan sinyal lain yang tidak diinginkan dalam sistem kontrol tertentu. Pada banyak kasus, hal ini memerlukan pemakaian filter high-pass, *filter* low-pass atau filter notch untuk mengurangi atau menghilangkan sinyal yang tidak diinginkan tersebut. Contoh proses filter yang dapat dipenuhi oleh filter pasif adalah hanya dengan memakai resistor, kapasitor, dan induktor, atau filter aktif dengan memakai penguatan dan balikan (*feedback*).

Penyesuaian impedansi adalah elemen yang penting dalam pengkondisian sinyal ketika impedansi internal dari sensor atau impedansi saluran transmisi dapat menyebabkan kesalahan (*error*) dalam pengukuran variabel dinamis. Rangkaian yang menggunakan komponen aktif dan pasif digunakan untuk mengadakan penyesuaian impedansi tersebut.

e. Konsep Pembebanan

Salah satu yang menjadi perhatian utama dalam pengkondisian sinyal analog adalah pembebanan satu rangkaian oleh rangkaian lainnya. Disini dikenalkan adanya ketidakpastian amplitudo dari suatu sinyal tegangan. Jika tegangan ini merepresentasikan beberapa variabel proses, maka adaketidakpastian dalam nilai variabel tersebut.

Gambar 2.23 Konsep Pembebanan

Gambar 2.23 Konsep Pembebanan Pembebanan dapat dijelaskan sebagai berikut. Sebagai misal keluaran dari rangkaian terbuka dari beberapa komponen elektronika menghasilkan suatu tegangan y $_{y1} = V_{x}$, sesuai gambar 2.23 (a).

Rangkaian terbuka berarti tidak terhubung dengan rangkaian yang lain. Pembebanan terjadi ketika kita menhubungkannya dengan sebuah beban atau rangkaian terintegrasi yang ditambahkan ke keluaran tadi (lihat Gambar 2.23 (b)) dan tegangan keluaran tadi menjadi turun beberapa volt jika debandingkan dengan rangkaian yang terbuka sebelumnya, dimana $V_{y2} < V_{y1}$. Pembebanan yang berbeda akan menghasilkan pengurangan (*drop*) tegangan yang berbeda pula. Nilai V_{y1} jika diukur dengan voltmeter akan menunjukkan sebesar $V_{y1} = V_x$. Berbeda dengan dengan sewaktu kita beri beban sesuai gambar 2.23 (b), maka nilai V_{y2} yang ditunjukkan oleh voltmeter

sebesar $V_{y2} = V_x(\frac{R_L}{R_L + R_x})$, atau

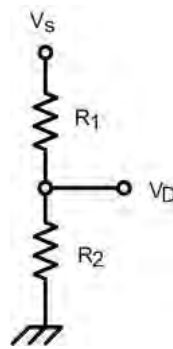
sebesar $V_{y2} = V_x(1 - \frac{R_x}{R_L + R_x})$.

Jika besaran listrik berupa sinyal yang berfrekuensi atau sinyal digital, maka pembebanan bukan merupakan suatu masalah. Dalam hal ini, sinyal setelah ada pembebanan tidak akan terjadi error dalam hal besaran frekuensinya. Pembebanan sangat penting ketika besaran yang dipakai adalah amplitudonya. Ada dua jenis rangkaian pengkondisi sinyal, yaitu rangkaian pasif dan rangkaian aktif. Ada beberapa contoh rangkaian pasif, yaitu rangkaian pembagi (*divider circuits*), rangkaian jembatan (*bridge circuits*), filter RC (*RC filter*) dan lainlain.

Rangkaian jembatan dan pembagi merupakan dua teknik rangkaian pasif yang telah digunakan untuk pengkondisi sinyal sudah lama sekali. Meskipun rangkaian aktif yang modern menggantika teknik ini, masih banyak aplikasi yang menggunakan teknik ini dengan keuntungannya. Rangkaian jembatan secara khusus dipakai untuk mendapatkan akurasi tinggi dalam pengukuran impedansinya. Ada rangkaian yang mempunyai perubahan impedansi yang sangat kecil, maka disinilah diperlukan rangkaian jembatan ini.

Tipe rangkaian pasif lain yang dilibatkan dalam pengkondisian sinyal adalah memfilter frekuensi yang tidak diinginkan dari sinyal yang terukur. Di dalam praktek industri atau di bidang elektronika yang lain, ditemukan sinyal dengn *noise* (sinyal yang tidak diinginkan) yang mempunyai frekuensi rendah atau frekuensi tinggi, padahal sinyal yang seperti ini tidak diharapkan untuk muncul.

Sebagai contoh adalah sensor untuk mengkonversi temperatur menghasilkan sinyal tegangan dc, proposional terhadap temperatur. Karena sumber power yang digunakan di lingkungan sekitar menggunakan sinyal ac

60 Hz (tegangan listrik PLN), ada kemungkinan sinyal 60 Hz tersebut mempengaruhi keluaran tegangan sensor yang tentunya ada perbedaan dengan temperatur yang seharusnya proposional tadi. Rangkaian pasif yang terdiri dari resistor dan kapasitor seringkali dipakai untuk mengeliminir *noise* yang mempunyai frekuensi tinggi dan rendah tanpa ada perubahan sinyal yang seharusnya.

Gambar 2.24 Rangkaian Pembagi Tegangan yang Sederhana

Rangkaian pembagi tegangan (*divider circuits*) dasar deperlihatkan pada gabar 2.25 seringkali digunakan untuk mengkonversi (merubah) nilai resistansi yang bervariasi menjadi tegangan yang bervariasi pula. Hubungan tegangan keluaran dari rangkaian pembagi *V D*, resistor (*R* 1, *R* 2) dan tegangan sumber (*V S*) adalah

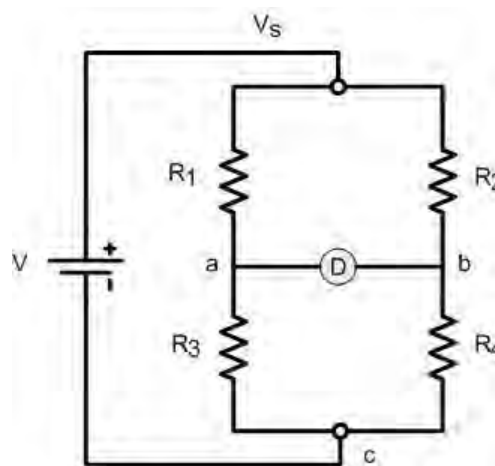
$$V_D = \frac{R_2 V_s}{R_1 + R_2}$$

dimana V_s = tegangan sumber

R_1, R_2 = reistor pembagi

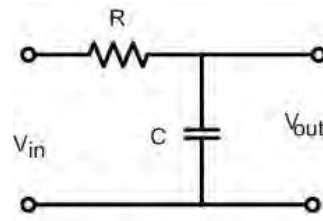
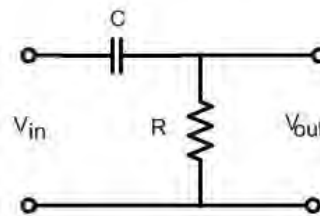
Rangkaian jembatan (bridge circuit) digunakan untuk mengkonversi impedansi yang bervariasi menjadi tegangan yang bervariasi pula. Salah satu keuntungan menggunakan rangkaian jembatan ini adalah dapat didesain untuk menghasilkan sinyal tegangan yang bervariasi terhadap *ground* (tegangan yang bernilai nol). Jika pada mobil maka badan mobil atau minus baterai yang menjadi ground. Ini berarti bahwa penguatan dapat

dipakai untuk menambah level tegangan untuk penambahan sensitivitas pada impedansi yang bervariasi. Gambar 2.26 menunjukkan rangkaian jembatan yang disebut jembatan *wheatstone*.

Rangkaian ini dipakai untuk aplikasi pengkondisi sinyal dimana sebuah sensor yang merubah resistansi menjadi tegangan sebagai variabel proses, menjadi masukan ke kontroler yang sebelumnya dibandingkan dengan referensi (lihat blok diagram sistem kontrol tertutup pada gambar 9.3).

Gambar 2.25 Rangkaian Jembatan Wheatstone DC Dasar

Banyak modifikasi yang dilakukan pada rangkaian jembatan dasar ini untuk aplikasi lain yang lebih spesifik. Pada Gambar 2.25, obyek dengan lebel D adalah sebuah detektor tegangan (*vlotage detector*) dipakai untuk membandingkan tegangan (*potensial*) di titik antara a dan pada rangkaian. Dalam aplikasi yang modern, detektor merupakan amplifier diferensial dengan impedansi input yang tinggi. Dalam kasus ini beda potensial (ΔV) antara titik a dan b dirumuskan menjadi dimana :

$V\,a$ = Tegangan titik a terhadap titik c (ground atau tegangan referensi)

$V\,b$ = Tegangan titik b terhadap titik c (ground atau tegangan referensi)

Gambar 2.26 Rangkaian Filter pasif

Nilai *V a* dan *V b* sekarang dapat ditentukan, dimana *V a* merupakan tegangan sumber V yang dibagi oleh *R* 1 dan *R* 3

$$V_a = \frac{VR_3}{R_1 + R_3}$$

dengan cara yang sama maka *V b* , pembagi tegangan diberikan oleh

$$V_a = \frac{VR_4}{R_2 + R_4}$$

dimana

V = sumber tegangan rangkaian.

Jika persamaan di atas dikombinasikan, maka beda tegangan dapat ditulis menjadi

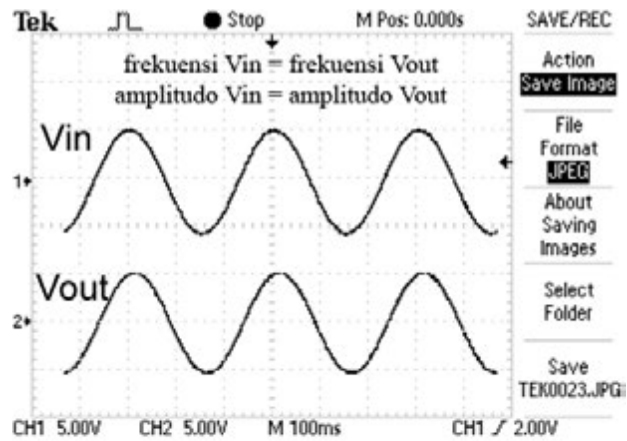
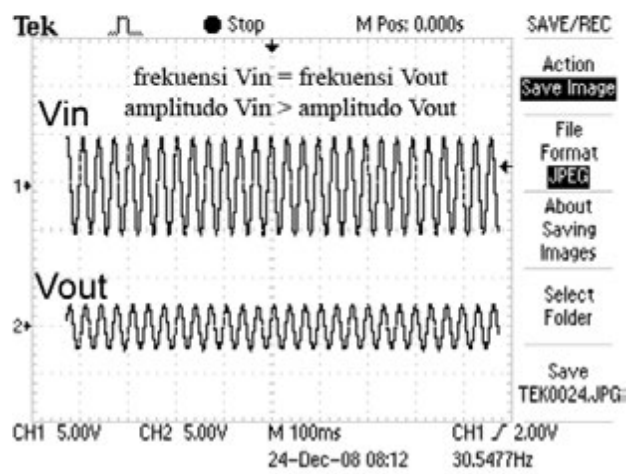
$$\Delta V = \frac{VR_3}{R_1 + R_3} - \frac{VR_4}{R_2 + R_4}$$

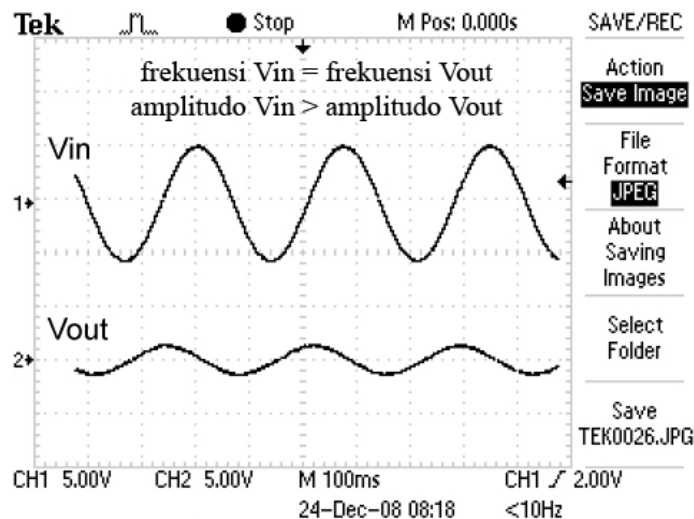
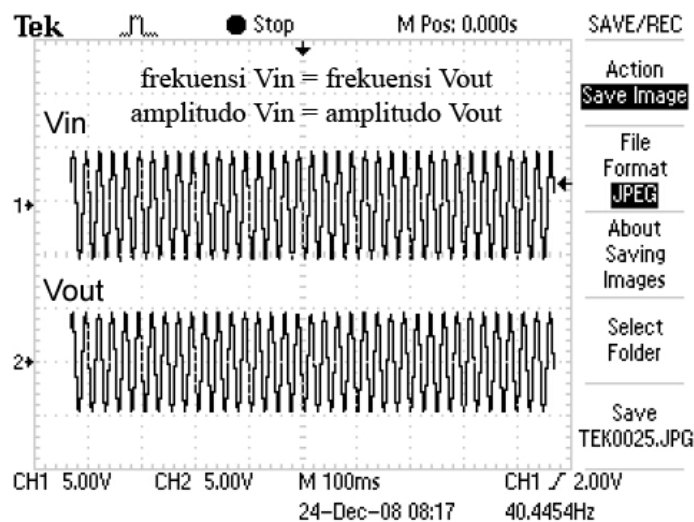
memakai beberapa persamaa algebra matematika, dapat ditunjukkan persamaan tersebut menjadi

$$\Delta V = V \frac{R_3 R_2 - R_1 R_4}{(R_1 + R_3).(R_2 + R_4)}$$

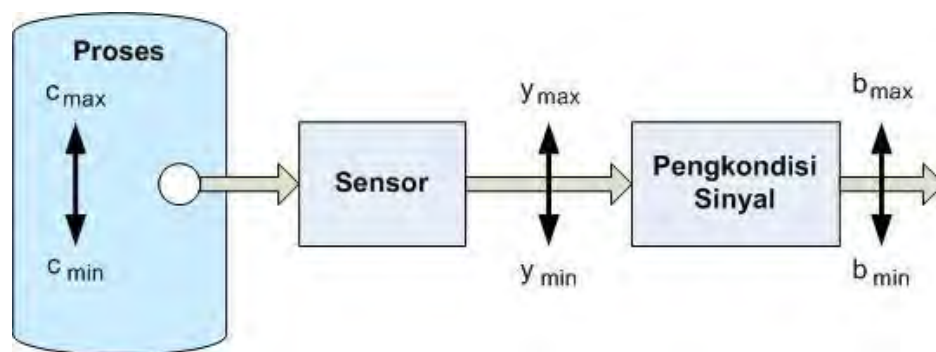
Persamaan ini menunjukkan bagaimana beda potensial dari detektor adalah sebuah fungsi dari sumber tegangan dan nilai-nilai dari resistor. Jika hasil yang didapatkan dari nilai beda potensial ΔV adalah nol, maka akan kita dapakan bahwa

$$R_3 R_2 = R_1 R_4$$

Untuk mengeleminasi sinyal *noise* yang tidak diinginkan dari pengukuran, seringkali diperlukan pemakaian rangkaian untuk meneruskan atau menghilangkan sinyal dalam daerah frekuensi tertentu. Rangkaian ini disebut filter. Filter yang sederhana dapat dibuat dari sebuah resistor dan sebuah kapasitor. Rangkaian ini bisa membentuk rangkaian filter *Lowpass* dan filter *Highpass*. Filter *Lowpass*

Gambar 2.27 Hasil Eksperimen dari Rangkaian Filter Pasif

Lowpass dapat menghilangkan frekuensi tinggi dan meneruskan sinyal frekuensi rendah. Dalam hal ini adalah nilai amplitudonya yang nilainya dibuat tetap pada frekuensi tertentu atau dibuat berkurang hingga menjadi nol pada frekuensi tertentu. Dengan filter *Lowpass*, jika ada sinyal yang dengan *Highpass* frekuensi yang semakin tinggi, maka amplitudo sinyal tersebut akan semakin berkurang. Rangkaian ini bisa dibuat seperti yang terlihat di Gambar 2.26 (a). Hasil eksperimen dengan mengunakan alat ukur osiloskop ditunjukan pada Gambar 2.27.

Gambar 2.28 Hasil Eksperimen dari Rangkaian Filter Pasif

Dengan memberikan nilai frekuensi yang berbeda antara sinyal *V in* pada Gambar 2.27 (a) dan *V in*, Gambar 2.27 (b) maka menghasilkan sinyal *V out* yang berbeda pula dalam hal amplitudo. Tetapi nilai frekuensinya tidak berubah. Dan ada pergeseran phase antara *V in* dan *V out* , hanya saja masalah pergeseran phase tidak di bahas dalam buku ini. Sebaliknya pada filter *Highpass*, F ilter ini mampu menghilangkan sinyal dengan frekuensi rendah dan meneruskan frekuensi tinggi. Tentunya nilai amplitudo yang menjadi kecil ataukah tetap.

Rangkaian RC untuk filter ini ditunjukkan pada Gambar 2.26 (b). Hasil eksperimen dengan mengunakan alat ukur osiloskop ditunjukan pada Gambar 2.28. Dengan memberikan nilai frekuensi yang berbeda antara sinyal *in V* pada Gambar 2.28 (a) dan *V in* , Gambar 2.28 (b) maka menghasilkan sinyal *V out* yang berbeda pula dalam hal amplitudo. Tetapi nilai frekuensinya tidak berubah. Dan ada pergeseran phase antara *V in* dan *V out* , hanya saja masalah pergeseran phase tidak di bahas dalam buku ini.

Gambar 2.29 Model dari Pengukuran dan Pengkondisi Sinyal

Pada bagian ini dibahas mengenai petunjuk pendesainan, sesuatu hal yang harus dipertimbangkan sewaktu mendesain sebuah sistem pengkondisian sinyal analog.

Contoh disini menunjukkan bagaimana petunjuk ini dipakai untuk mengembangkan suatu desain. Petunjuk di bawah untuk memastikan bahwa suatu masalah bisa dipahai dengan benar dan disini dibahas mengenai hal-hal yang penting. Tidak semua petunjuk akan menjadi sesuatu yang penting dalam setiap pendesainan, bisa saja beberapa tidak sesuai dengan aplikasi yang kita buat. Pada banyak kasus, tidak cukup informasi yang kurang dalam menunjukkan suatu masalah dengan baik, maka seorang desainer harus mempunyai kemampuan teknik yang baik danterlatih dalam setiap bagian desain.

Gambar 2.29 menunjukkan model pengukuran dan pengkondisi sinyal. Dalam beberapa hal pada keseluruhan sistem dikembangkan, dari pemilihan

sensor sampai mendesain pengkondisi sinyal. Dalam hal yang lain, hanya pengkondisi sinyal yang akan dikembangkan. Petunjuk dibawah dibuat secara umum. Karena sensor dipilih dari yang tersedia, desain dibuat secara aktual dan benar-benar untuk pengkondisi sinyal yang sesuai. Petunjuk untuk mendesain pengkondisi sinyal analog adalah sebagai berikut :

9. Pengkondisian Sinyal Digital (*Digital Signal Conditioning*)

Keseluruhan survei menunjukkan bahwa aplikasi elektronika yang terjadi di bidang industri menunjukkan bahwa perkembangan teknik digital terjadi sangat cepat. Ada banyak alasan kenapa hal ini bisa terjadi, tetapi hanya dua alasan pada bagian ini yang penting. Salah satunya adalah pengurangan terhadap ketidakpastian, hubungannya informasi yang dikodekan secara digital dibandingkan dengan informasi secara analog.

Sebagai catatan yang kita bicarakan adalah ketidakpastian (*uncertainty*), buka akurasi (*accuracy*). Jika sebuah sistem menunjukkan informasi secara analog, harus sangat diperhatikan pengaruh noise secara elektronik, penyimpangan penguatan *amplifier*, efek pembebanan, dan masalah lainnya yang biasa terjadi pada pendesainan elektonika analog. Pada sinyal yang terkodekan secara digital, dimana, kabel pembawa dengan level *high* (1) atau *low* (0), bukan merupakan masalah hubungannya dengan pemrosesan analognya. Maka ada kepastian yang tak terpisahkan di dalam representasi informasi pengkodean secara digital karena tidak mungkin adanya pengaruh yang sifatnya palsu dari informasi tersebut. Alasan kedua dari perkembangan elektronika digital adalah pertumbuhan keinginan dalam pemakaian komputer digital dalam proses industri. Komputer digital, secara alami, memerlukan informasi yang terkodekan dalam format digital sebelum informasi tersebut dipakai. Pemakaian pengkodisi sinyal secara digital tentunya menjadi pertanyaan mengapa komputer dipakai secara luas di di industri. Ada beberapa alasan yang bisa menjawab pertanyaan tersebut, yaitu :

1. Sebuah komputer bisa dipakai untuk mengontrol dengan mudah dari suatu sistem konrol dengan banyak variabel.

2. Melalui pemrograman komputer, ketidaklinearan dari sebuah keluaran sensor dapat di linearkan.

3. Persamaan kontrol yang rumit dapat diselesaiakan untuk menentukan fungsi kontrol yang diperlukan.

4. komputer mempunyai kemampuan dalam bentuknya yang kecil berupa rangkaian pemrosesan digital yang kompleks, sebagai rangkaian yang terintergrasi (IC = *integrated circuit*).

Akhirnya, perkembangan mikroprosesor telah menyempurnakan suatu perubahan bentuk kontrol proses secara digital sebagai dasar sistem kontrol. Dengan mikroprosesor (dasar dari komputer), implementasi sebuah komputer sebagai dasar sistem kontrol telah menjadi hal yang praktis, dan dengan itu tentunya diperlukan pengetahuan mengenai pengkondisian sinyal secara digital. Teknologi tersebut mengurangi tidak hanya dalam ukuran fisiknya, tetapi juga konsumsi daya dan rata-rata kegagalan yang terjadi.

Pemakaian teknik digital di dalam sistem kontrol memerlukan pengukuran variabe proses dan informasi kontrol yang dikodekan ke dalam bentuk digital. Sinyal digital mempunyal dua jenis level tegangan yang sederhana di dalam sebuah kabel. Kita katakan bahwa informasi digital mempunyai kondisi *high* (H atau 1) dan *low* (L atau 0) pada sebuah kabel yang membawa sinyal digital. Sebelum belajar mengenai pengolahan sinyal digital, sebaiknya perlu kita pelajari dulu mengenai konsep bilangan dan dasar elektronika digital terlebih dahulu.

10. Definisi – Definisi

- **Sistem** : kombinasi beberapa komponen yang bekerja secara bersama-sama dan membentuk suatu tujuan tertentu.
- **Proses (alamiah)** : suatu urutan operasi yang kontinu atau suatu perkembangan yangdicirikan leh urutan perubahan secara perlahan

yang terjadi tahap demi tahap dengan cara yang relatif tetap dan memberikan suatu hasil atau akhir.

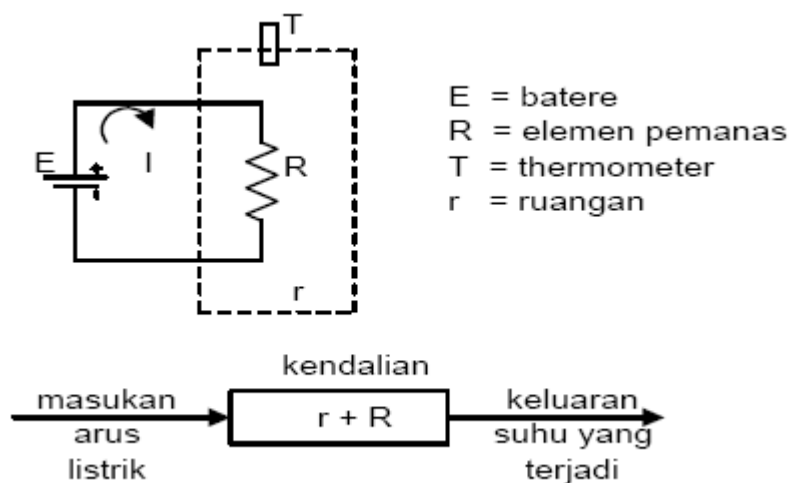
- **Proses (artifisial)** : operasi yang dilakukan secara berkesinambungan yang terdiridari beberapa aksi yang dikendalikan atau pergerakan yang secara sistematikdiarahkan pada suatu hasil atau akhir.
- **Plant** : dapat berupa bagian suatu peralatan yang berfungsi secara bersama-sama untuk membentuk suatu operasi tertentu.
- **Gangguan** : suatu sinyal yang cenderung mempengaruhi (secara acak) nilai output suatu sistem: gangguan internal dan eksternal.
- **Sistem kendali umpan balik** (*feedback control system*) : sistem kendali yangmempunyai elemen umpan balik, yang berfungsi untuk mengamati keluaran yang terjadi untuk dibandingkan dengan masukannya (yang diinginkan). Sistem kendali kadang dibedakan menjadi dua kelas. Jika tujuan sistem kendali untukmempertahankan variabel fisik pada beberapa nilai yang konstan dengan adanya gangguan-gangguan, disebut sebagai
- **pengatur** (*automatic regulating system*). Contohnya adalah sistem kendali suhu dan lain-lain. Jenis yang kedua adalah
- **sistem kendali posisi** atau **servo mekanisme** (*servomechanism*), yaitu sistem yangdigunakan untuk mengendalikan posisi atau pergerakan mekanis, seringkalidigunakan untuk menggambarkan sistem kendali dengan variabel fisik yang harus mengikuti atau melacak, dalam fungsi waktu yang diinginkan. Contohnya adalah gerakan lengan robot dan lain-lain.
- **Sistem kendali proses** (*process control system*) : sistem kendali yang umum digunakan pada industri, seperti untuk mengendalikan temperatur, tekanan, aliran,tinggi muka cairan dan lain-lain.
- **Sistem kendali lingkar terbuka** (*open loop system*) : sistem kendali dimana tidak terdapat elemen yang mengamati keluaran yang terjadi untuk dibandingkan dengan masukannya (yang diinginkan), meskipun menggunakan sebuah pengendali (*controller*) untuk memperoleh tanggapan yang diinginkan.

- **Sistem kendali lingkar tertutup** (*closed loop system*): sebutan lain dari sistem kendali dengan umpan balik.

11. Sistem Lingkar Terbuka dan Sistem Lingkar Tertutup

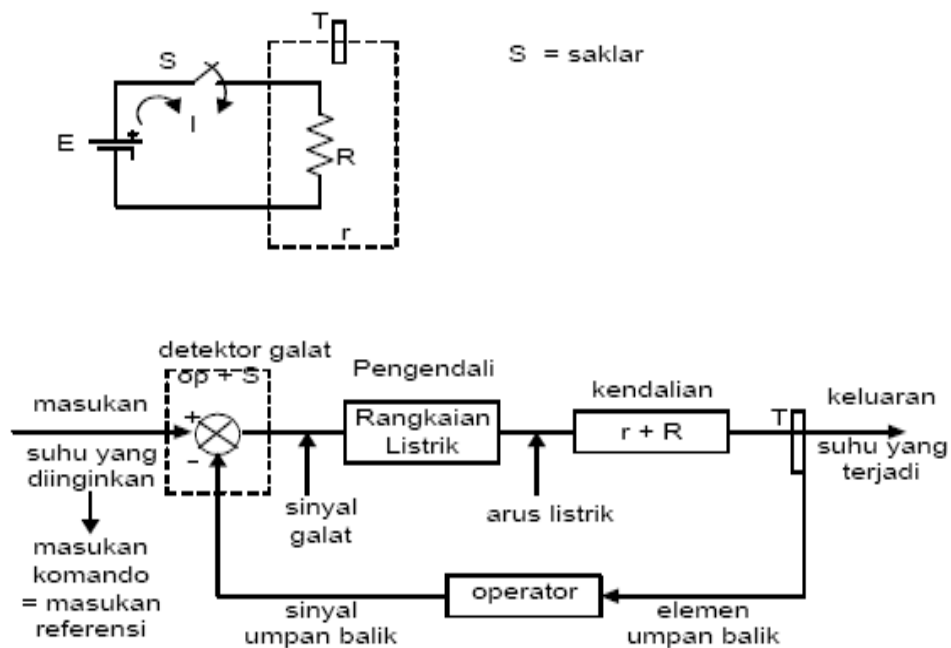
Sistem kendali lingkar terbuka menggunakan actuator (*actuating device*) secara langsung untuk mengendalikan proses tanpa melalui umpan balik.

Contoh : Sistem kendali suhu ruang

Misalkan di daerah dingin, diinginkan mengatur suhu ruangan dengan menggunakan pemanas (*heater*). Pemanas dapat dibuat dari suatu rangkaian listrik yang berintikan adanya resistor R. Bila resistor R dialiri arus listrik, akan terjadi disipasi daya □I R□□2 , yang menghangatkan ruangan r.

Gambar 2.30 Diagram Blok Sistem Kendali
Suhu Ruang Lingkar Terbuka

Terlihat bahwa keluaran tidak mempengaruhi masukan. Sistem ini disebut sistem kendali lingkar terbuka. Sistem kendali lingkar tertutup menggunakan pengukuran keluaran (*actual response*), yang dijadikan

umpan balik untuk dibandingkan dengan nilai referensi (*desired response*), sehingga menghasilkan galat. Dengan galat inilah pengendali dapat memberikan sinyal kendali agar keluaran proses mencapai kondisi yang diinginkan.

Dengan contoh yang sama pada sistem lingkar terbuka ditambahkan saklar S yang akan membatasi aliran listrik I. Bila suhu ruangan lebih kecil atau sama dengan suhu yang diinginkan maka saklar harus dalam keadaan tertutup, sehingga arus mengalir dan ruangan menghangat. Bila suhu ruangan lebih besar dari suhu yang diinginkan, maka saklar S harus dibuka untuk memutuskan aliran arus listrik, sehingga ruangan tidak bertambah panas. Untuk itu diperlukan seorang operator yang senantiasa mengamati penunjukkan thermometer T. Operator ini berfungsi sebagai elemen umpan balik dan juga sebagai *error detector* (bersama-sama dengan saklar S).

Gambar 2.31 Diagram Blok Sistem Kendali
Suhu Ruang Lingkar Tertutup Manual

Operator berfungsi mengamati keluaran, lalu mengevaluasi (membandingkan keluaran dan masukannya) dan membangkitkan sinyal penggerak yang akan menggerakkan sistem sehingga keluaran seperti yang diinginkan. Terlihat bahwa keluaran mempengaruhi masukan (melalui

operator). Sistem ini disebut sistem kendali lingkar tertutup. Beberapa istilah yang sering dipakai sebagai berikut.

a. Keluaran sistem merupakan variabel yang diatur (*controlled variable*).

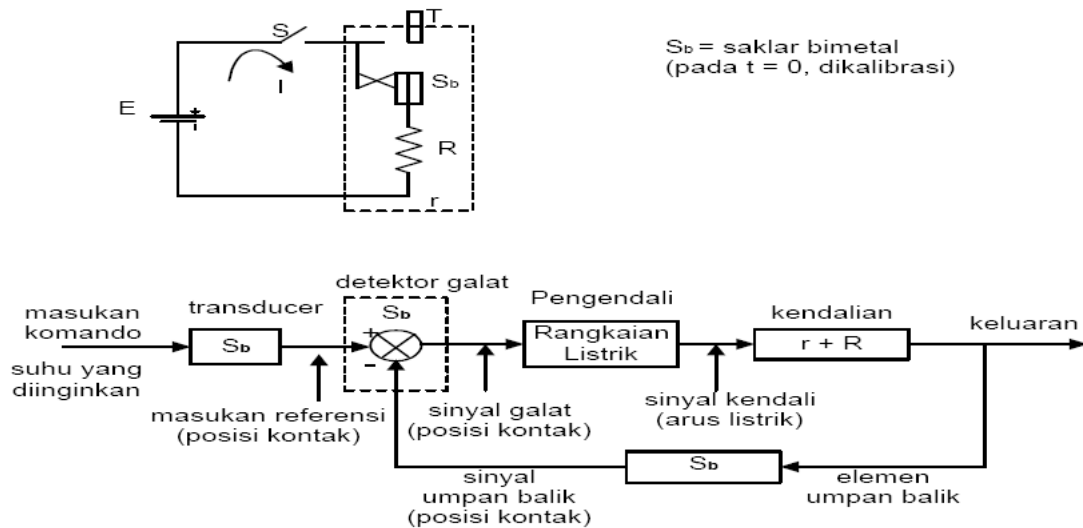
b. Masukan sistem terdiri dari

- Masukan komando (*command input*) = masukan informatif = masukan fiktif, yang oleh masukan tranduser diubah (bila perlu) menjadi masukan referensi (*reference input*)
- Masukan referensi = masukan fisis bersama-sama dengan sinyal umpan balikakan menghasilkan sinyal penggerak (sinyal galat).

c. Sinyal galat merupakan masukan dari pengendali (*controller*).

d. Masukan kendalian dihasilkan oleh pengendali.

e.Elemen umpan balik mengamati keluaran dan mengumpanbalikkan ke masukan,yaitu dengan adanya sinyal umpan balik.

Bila hanya saklar S yang dipasang, maka masih diperlukan seorang operator yangsenantiasa harus mengamati penunjukan termometer. Sistem ini meskipun sudahmerupakan sistem kendali lingkar tertutup tetapi masih manual. Dengan menambahkansebuah saklar otomatis (saklar bimetal, Sb) yang telah dikalibrasi sesuai dengan suhu yangdiinginkan maka bila suhu ruangan lebih kecil atau sama dengan yang diinginkan makasaklar Sb dalam keadaan tertutup dan arus listrik mengalir memanaskan ruangan sedangkanbila suhu ruangan lebih besar dari suhu yang diinginkan maka saklar Sb akan terbuka danarus listrik terputus. Sistem kendali lingkar tertutup ini sudah bekerja secara otomatis.Lihat Gambar 2.32 berikut.

Gambar 2.32 Diagram Blok Sistem
Kendali Suhu Ruangan Lingkar Tertutup Otomatik

12. Sistem Kendali Manual dan Otomatis

Secara umum sistem kendali dapat dikelompokkan sebagai berikut

12.1 Dengan Manual dan Otomatis

Pengendalian secara manual adalah pengendalian yang dilakukan oleh manusia yang bertindak sebagai operator sedangkan pengendalian secara otomatis adalah pengendalian yang dilakukan oleh mesin-mesin/peralatan yang bekerja secara otomatis dan operasinya dibawah pengawasan manusia. Contoh pengendalian secara manual banyak ditemukan dalam kehidupan sehari-hari seperti pada pengaturan suara radio, televisi, pengaturan cahaya layar televisi, pengaturan aliran air melalui kran dan lain-lain sedangkan pengendalian otomatis banyak ditemui dalam proses industri, pengendalian pesawat terbang, pembangkitan tenaga listrik dan lain-lain.

12.2 Jaringan Terbuka dan Jaringan Tertutup

Sistem kendali dengan jaringan tertutup adalah sistem pengendalian dimana besaran keluaran memberikan efek terhadap besaran masukan sehingga besaran yang dikendalikan dapat dibandingkan terhadap harga yang diinginkan melalui alat pencatat. Selanjutnya perbedaan harga yang terjadi antara besaran yang dikendalikan dan penunjukkan alat pencatat digunakan sebagai koreksi pada gilirannya akan merupakan sasaran pengendalian. Sistem kendali dengan jaringan terbuka adalah sistem pengendalian dimana keluaran tidakmemberikan efek terhadap besaran masukan sehingga variabel yang dikendalikan tidakdapat dibandingkan terhadap harga yang diinginkan. Aplikasi sistem jaringan terbuka dan tertutup ditemui dalam kehidupan sehari-hari sebagai berikut : jika seseorang mengendarai mobil maka jalur kecepatan beserta percepatan kendaraan tersebut dapat ditentukan dan dikendalikan oleh pengendara dengancara mengamati lalu kondisi lalu lintas dan mengendalikan setir, rem dan alat- alat pengendali lainnya. Jika pengendara ingin memelihara kecepatan pada suatu harga yang konstan (sebagai keluaran) maka pengendara dapat mengaturnya melalui pedal percepatan (gas) dan harga ini secara tepat dapat diperoleh dengan mengamati penunjukkanspedometer. Dengan mengamat besarnya keluaran tersebut setiap saat berarti akan diberikan diberikan suatu informasi terhadap masukan (dalam hal ini pengendara dan pedalgas) sehingga jika terjadi penyimpangan terhadap kecepatan, pengendara dapatmengendalikannya kembali ke harga seharusnya. Contoh tersebut merupakan contohsistem kendali dengan jaringan tertutup dan akan berubah menjadi sistem kendali dengan jaringan terbuka jika kendaraan tersebut tidak dilengkapi dengan speedometer.

13. Kontinu (analog) dan diskontinu (diskrit)

Untuk pengendalian sistem kendali jenis kontinu (analog) ini dapat dibagi menjadi beberapa bagian yaitu

- o Proporsional. Pada pengendalian proporsional ini dimana keluaran sebanding dengan penyimpangan. Contohnya pengendalian uap melalui katup, pengendalian transmiter tekanan dan lain-lain
- o Integral. Pada pengendalian integral ini dimana keluaran selalu berubah-ubahselama terjadi deviasi dan kecepatan perubahan keluaran tersebut sebanding dengan penyimpangan. Contohnya pengendalian level cairan dalam tangki, pengendalian sistem tekanan dan lain-lain
- o Differensial. Pengendalian integral jarang dipakai secara tersendiri tetapi digabungkan dengan jenis proporsional untuk menghilangkan keragu-raguan jika jenis proporsional ini memerlukan karakteristik yang stabil.

Untuk pengendalian sistem kendali jenis diskontinu (diskrit) dapat dibagi menjadibeberapa bagian :

- o Pengendalian dengan dua posisi. Contohnya relai, termostat, level, saklar ONOFF dan lain-lain.
- o Pengendalian dengan posisi ganda. Contohnya saklar pemilih (selector switch). Keuntungannya cenderung mengurangi osilasi
- o Pengendalian Floating. Posisi yang relatif tidak terbatas, dalam jenis ini, pemindahan energi dapat dilakukan melalui salah satu daripada beberapa kemungkinan yang ada.

14. Prinsip-Prinsip Disain Sistem Kendali

a. Persyaratan umum sistem kendali.

Setiap sistem kendali harus bersifat stabil. Ini merupakan persyaratan utama. Di samping kestabilan mutlak, suatu sistem kendali harus mempuyai kestabilan relatif yang layak. Suatu sistem kendali juga harus mampu memperkecil kesalahan sampai nol atau sampai pada suatu harga yang dapat ditoleransi.

b. Persoalan dasar dalam disain sistem kendali.

Pada kondisi praktis, selalu ada beberapa gangguan yang bekerja pada plant. Gangguan ini mungkin berasal dari luar atau dari dalam mungkin bersifat acak dan mungkin pula dapat diramalkan. Kendalian harusmemperhitungkan setiap gangguan yang akan mempengaruhi variabel keluaran. **Analisis.** Analisis sistem kendali adalah penelitian pada kondisi tertentu dimana performansi sistem yang model matematiknya diketahui. **Disain.** Disain sistem kendali adalah proses pencarian suatu sistem yang dapat menyelesaikan tugas yang diberikan. Pada umumnya prosedur disain tidak diperoleh secara langsung tetapi memerlukan metoda coba-coba **Sintesis**. Sintesis adalah mencari suatu sistem dengan prosedur langsung yang akan bekerja menurut cara tertentu. Biasanya prosedur semacam ini bersifat matematis dari awal sampai akhir proses disain.

c. Pendekatan dasar dalam disain sistem kendali.

Pendekatan dasar dalam disain setiap sistem kendali praktis perlu melibatkan metoda coba-coba. Sintesis sistem kendali linier secara teoritis dapat dilakukan dan secara matematis, desainer dapat menentukan komponen-komponen yang diperlukan untuk mencapai sasaran yang diberikan. Meskipun demikian, dalam praktek mungkin sistem dibatasi oleh beberapa kendala atausifat nonlinier. Di samping itu, karakteristik komponen mungkin tidak dapat diketahui dengan tepat. Jadi selalu diperlukan prosedur coba-coba

15. Komponen-Komponen Sistem Kendali

Sesuai dengan fungsi pengendalian secara menyeluruh maka komponen-komponen sistem pengendalian dibagi dalam 4 bahagian yaitu:

a. Sensor dan Transduser

Sensor digunakan sebagai elemen yang langsung mengadakan kontak dengan yang diukur sedangkan transduser berfungsi untuk mengubah

besaran fisis yang diukur menjadi besaran fisis lainnya. Pada umumnya adalah mengubah besaran-besaran fisis menjadibesaran listrik seperti tekanan, temperatur, aliran, posisi dan lain-lain

b. *Error Detector*

Mengukur *error* (kesalahan) yang terjadi antara keluaran aktual dan keluaran yang diingini.

c. Penggerak

Alat ini berfungsi untuk mengendalikan aliran energi ke sistem yang dikendalikan. Alat ini disebut juga elemen pengendali akhir misalnya motor listrik, katup pengendali, pompa, silinder hidraulik dan lain-lain. Elemen keluaran ini harus mempuyai kemampuanuntuk menggerakkan beban ke suatu harga yang diinginkan.

d. Penguat

Penguat ini terbagi atas 2 bahagian yaitu penguat daya dan penguat tegangan. Penguat daya dibutuhkan karena hampir dalam semua kejadian daya dari *"error detector"* tidak cukup kuat untuk menggerakkan elemen keluaran sedangkan penguat tegangan biasanya banyak terdapat pada op-amp. Rangkaian ini dapat melakukan operasi-operasimatematis seperti penjumlahan, integrasi, differensiasi dan lainnya.

B. Sistem Digital Dasar

Sistem bilangan (number Sistem) adalah suatu cara untuk mewakili besaran dari suatu item fisik. Sistem bilangan yang banyak dipergunakan oleh manusia adalah Sistem biilangan desimal, yaitu sisitem bilangan yang menggunakan 10 macam symbol untuk mewakili suatu besaran. Sistem ini banyak digunakan karena manusia mempunyai sepuluh jari untuk dapat membantu perhitungan. Lain halnya dengan komputer, logika di komputer diwakili oleh bentuk elemen dua keadaan yaitu *off* (tidak ada arus) dan *on* (ada arus). Konsep inilah yang dipakai dalam sistem bilangan binary yang mempunyai dua macam nilai untuk mewakili suatu besaran nilai.

Teknik minimisasi dalam ilmu digital adalah suatu teknik yang digunakan untuk menyederhanakan suatu persamaan logika. Mengapa suatu persamaan logika perlu disederhanakan?

Suatu persamaan logika perlu disederhanakan agar jika persamaan logika itu kita buat menjadi sebuah rangkaian logika kita bisa ;

- Mengurangi jumlah komponen yang digunakan
- Mengurangi jumlah biaya yang diperlukan
- Mempersingkat waktu untuk merangkai
- Menghasilkan respon rangkaian lebih cepat karena delay rangkaian berkurang
- Memperkecil dimensi fisik rangkaian

Menganalisa rangkaian dengan mudah

1. Sistem Bilangan

Sistem bilangan (number Sistem) adalah suatu cara untuk mewakili besaran dari suatu item fisik. Sistem bilangan yang banyak dipergunakan leh manusia adalah Sistem biilangan desimal, yaitu sisitem bilangan yang menggunakan 10 macam symbol untuk mewakili suatu besaran. Sistem ini

banyak digunakan karena manusia mempunyai sepuluh jari untuk dapat membantu perhitungan. Lain halnya dengan komputer, logika di komputer diwakili oleh bentuk elemen dua keadaan yaitu *off* (tidak ada arus) dan *on* (ada arus). Konsep inilah yang dipakai dalam sistem bilangan binary yang mempunyai dua macam nilai untuk mewakili suatu besaran nilai.

Selain Sistem bilangan biner, komputer juga menggunakan Sistem bilangan octal dan hexadesimal.

1. Bilangan Desimal

   Sistem ini menggunakan 10 macam symbol yaitu 0,1,2,3,4,5,6,7,8,dan 9. Sistem ini menggunakan basis 10. Bentuk nilai ini dapat berupa integer desimal atau pecahan.

   <u>Integer desimal :</u>

   adalah nilai desimal yang bulat, misalnya 8598 dapat diartikan :

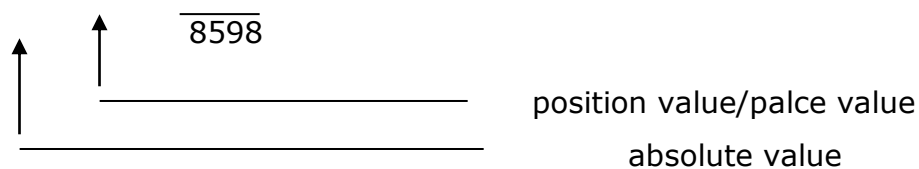
   $8 \times 10^3 = 8000$

   $5 \times 10^2 = 500$

   $9 \times 10^1 = 90$

   $8 \times 10^0 = 8$

   8598

   position value/palce value

   absolute value

Absolue value merupakan nilai untuk masing-masing digit bilangan, sedangkan position value adalah merupakan penimbang atau bobot dari masing-masing digit tergantung dari letak posisinya, yaitu nernilai basis dipangkatkan dengan urutan posisinya.

Pecahan desimal :

Adalah nilai desimal yang mengandung nilai pecahan dibelakang koma, misalnya nilai 183,75 adalah pecahan desimal yang dapat diartikan :

$1 \times 10^{2} = 100$

$8 \times 10^{1} = 80$

$3 \times 10^{0} = 3$

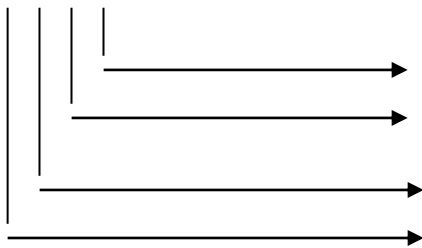
$7 \times 10^{-1} = 0{,}7$

$5 \times 10^{-2} = 0{,}05$

183,75

2. Bilangan Binar

Sistem bilangan binary menggunakan 2 macam symbol bilangan berbasis 2digit angka, yaitu 0 dan 1.

Contoh bilangan 1001 dapat diartikan :

Operasi aritmetika pada bilangan Biner :

a. Penjumlahan

Dasar penujmlahan biner adalah :

0 + 0 = 0

0 + 1 = 1

1 + 0 = 1

1 + 1 = 0 → dengan carry of 1, yaitu 1 + 1 = 2, karena digit terbesar ninari 1, maka harus dikurangi dengan 2 (basis), jadi 2 – 2 = 0 dengan carry of 1

contoh :

```
  1111
 10100 +
-------
100011
```

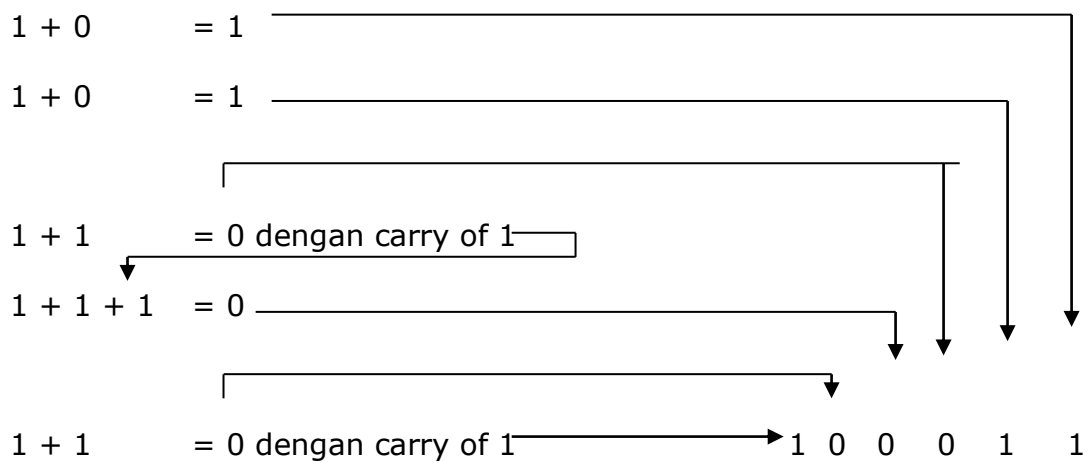
atau dengan langkah :

1 + 0 = 1

1 + 0 = 1

1 + 1 = 0 dengan carry of 1

1 + 1 + 1 = 0

1 + 1 = 0 dengan carry of 1 → 1 0 0 0 1 1

b. Pengurangan

Bilangan biner dikurangkan dengan cara yang sama dengan pengurangan bilangan desimal. Dasar pengurangan untuk masing-masing digit bilangan biner adalah :

0 - 0 = 0

1 - 0 = 1

1 - 1 = 0

0 – 1 = 1 → dengan borrow of 1, (pijam 1 dari posisi sebelah kirinya).

Contoh :

```
11101
 1011 -
------
 10010
```

dengan langkah – langkah :

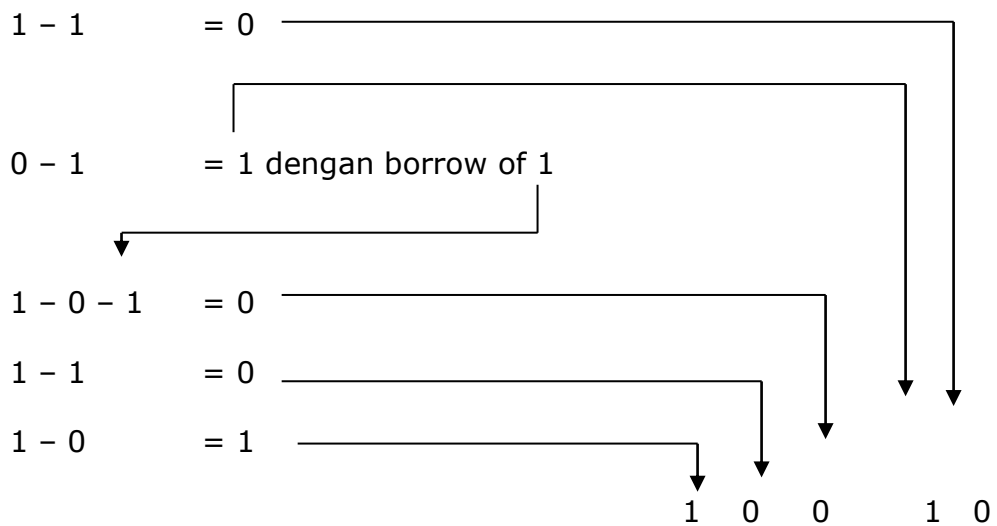
1 – 1 = 0

0 – 1 = 1 dengan borrow of 1

1 – 0 – 1 = 0

1 – 1 = 0

1 – 0 = 1

1 0 0 1 0

c. Perkalian

Dilakukan sama dengan cara perkalian pada bilangan desimal. Dasar perkalian bilangan biner adalah :

0 x 0 = 0

1 x 0 = 0

0 x 1 = 0

1 x 1 = 1

contoh

Desimal	Biner
14 12 x 28 14 + 168	1110 1100 x 0000 0000 1110 1110 + 10101000

d. pembagian

Pembagian biner dilakukan juga dengan cara yang sama dengan bilangan desimal. Pembagian biner 0 tidak mempunyai arti, sehingga dasar pemagian biner adalah :

0 : 1 = 0

1 : 1 = 1

Desimal	Biner
5 / 125 \ 25 10 - 25 25 - 0	101 / 1111101 \ 11001 101 - 101 101 - 0101 101 - 0

3. Bilangan Oktal

Sistem bilangan Oktal menggunakan 8 macam symbol bilangan berbasis 8 digit angka, yaitu 0 ,1,2,3,4,5,6,7.

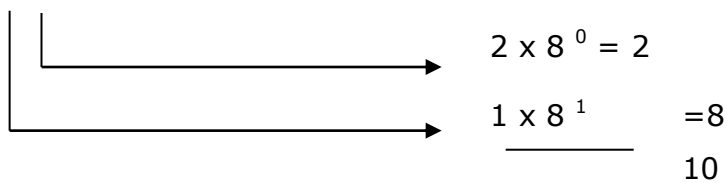
Position value Sistem bilangan octal adalah perpangkatan dari nilai 8.

Contoh :

$12_{(8)}$ = ... $_{(10)}$

$2 \times 8^0 = 2$

1×8^1 =8

10

Jadi 10 $_{(10)}$

Operasi Aritmetika pada Bilangan Oktal

a. Penjumlahan

Langkah-langkah penjumlahan octal :

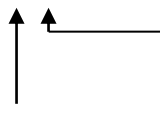
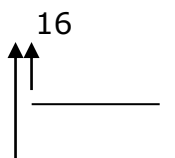
- tambahkan masing-masing kolom secara desimal
- rubah dari hasil desimal ke octal
- tuliskan hasil dari digit paling kanan dari hasil octal
- kalau hasil penjumlahan tiap-tiap kolom terdiri dari dua digit, maka digit paling kiri merupakan carry of untuk penjumlahan kolom selanjutnya.

Contoh :

Desimal	Oktal
21 87 + 108	25 127 + 154 $5_{10} + 7_{10} = 12_{10} = 14_8$ $2_{10} + 2_{10} + 1_{10} = 5_{10} = 5_8$ $1_{10} = 1_{10} = 1_8$

b. Pengurangan

Pengurangan Oktal dapat dilaukan secara sama dengan pengurangan bilangan desimal.

Contoh :

Desimal	Oktal
108 87 - ——— 21	154 127 - ——— 25 $4_8 - 7_8 + 8_8$ (borrow of) $= 5_8$ $5_8 - 2_8 - 1_8 = 2_8$ $1_8 - 1_8 = 0_8$

c. Perkalian

Langkah – langkah :

- kalikan masing-masing kolom secara desimal
- rubah dari hasil desimal ke octal
- tuliskan hasil dari digit paling kanan dari hasil octal
- kalau hasil perkalian tiap kolol terdiri dari 2 digit, maka digit paling kiri merupakan carry of untuk ditambahkan pada hasil perkalian kolom selanjutnya.

Contoh :

<table>
<tr><th>Desimal</th><th>Oktal</th></tr>
<tr><td>14
12 x
———
28
14 +
———
168</td><td>16
14 x
———
70
$4_{10} \times 6_{10} = 24_{10} = 30_8$
$4_{10} \times 1_{10} + 3_{10} = 7_{10} = 7_8$
16
14 x
———
70
———
16
$1_{10} \times 6_{10} = 6_{10} = 6_8$
$1_{10} \times 1_{10} = 1_{10} = 1_8$
———
16
14 x
———
70
16 +
———
250
$7_{10} + 6_{10} = 13_{10} = 15_8$
$1_{10} + 1_{10} = 2_{10} = 2_8$</td></tr>
</table>

d. Pembagian

Desimal	Oktal
12 / 168 \ 14 12 - 48 48 – 0	14 / 250 \ 16 14 ← $14_8 \times 1_8 = 14_8$ 110 110 - ← $14_8 \times 6_8 = 4_8 \times 6_8 = 30_8$ 0 $1_8 \times 6_8 = 6_8$ + 110_8

4. Bilangan Hexadesimal

Sistem bilangan Hexadesimal menggunakan 16 macam symbol bilangan berbasis 8 digit angka, yaitu 0 ,1,2,3,4,5,6,7,8,9,A,B,C,D,Edan F

Dimana A = 10, B = 11, C= 12, D = 13 , E = 14 dan F = 15

Position value Sistem bilangan octal adalah perpangkatan dari nilai 16.

Contoh :

$C7_{(16)}$ = …… $_{(10)}$

$7 \times 16^0 = 7$

$C \times 16^1 = 192$

199

Jadi 199 $_{(10)}$

Operasi Aritmetika Pada Bilangan Hexadesimal

a. Penjumlahan

Penjumlahan bilangan hexadesimal dapat dilakukan secara sama dengan penjumlahan bilangan octal, dengan langkah-langkah sebagai berikut :

Langkah-langkah penjumlahan hexadesimal :

- tambahkan masing-masing kolom secara desimal
- rubah dari hasil desimal ke hexadesimal
- tuliskan hasil dari digit paling kanan dari hasil hexadesimal
- kalau hasil penjumlahan tiap-tiap kolom terdiri dari dua digit, maka digit paling kiri merupakan carry of untuk penjumlahan kolom selanjutnya.

Contoh :

Desimal	hexadesimal
2989 1073 + 4062	BAD 431 + FDE $D_{16} + 1_{16} = 13_{10} + 1_{10} = 14_{10} = E_{16}$ $A_{16} + 3_{16} = 10_{10} + 3_{10} = 13_{10} = D_{16}$ $B_{16} + 4_{16} = 11_{10} + 4_{10} = 15_{10} = F_{16}$

b. Pengurangan

Pengurangan bilangan hexadesimal dapat dilakukan secara sama dengan pengurangan bilangan desimal.

Contoh :

Desimal	hexadesimal
4833 1575 - 3258	12E1 627 - CBA 16_{10} (pinjam) + 1_{10} - 7_{10} = 10_{10} = A_{16} 14_{10} - 7_{10} - 1_{10} (dipinjam) = 11_{10} = B_{16} 16_{10} (pinjam) + 2_{10} - 6_{10} = 12_{10} = C_{16} 1_{10} – 1_{10} (dipinjam) 0_{10} = 0_{16}

c. Perkalian

Langkah – langkah :

- kalikan masing-masing kolom secara desimal
- rubah dari hasil desimal ke octal
- tuliskan hasil dari digit paling kanan dari hasil octal
- kalau hasil perkalian tiap kolol terdiri dari 2 digit, maka digit paling kiri merupakan carry of untuk ditambahkan pada hasil perkalian kolom selanjutnya.

Contoh :

<table>
<tr><th>Desimal</th><th>Hexadesimal</th></tr>
<tr><td rowspan="3">172
27 x
———
1204
344 +
———
4644</td><td>AC
1B x
———
764
$C_{16} \times B_{16} = 12_{10} \times 11_{10} = 84_{16}$
$A_{16} \times B_{16} + 8_{16} = 10_{10} \times 11_{10} + 8_{10} = 76_{16}$</td></tr>
<tr><td>AC
1B x
———
764
AC
$C_{16} \times 1_{16} = 12_{10} \times 1_{10} = 12_{10} = C_{16}$
$A_{16} \times 1_{16} = 10_{10} \times 1_{10} = 10_{10} = A_{16}$</td></tr>
<tr><td>AC
1B x
———
764
AC +
———
1224
$6_{16} + C_{16} = 6_{10} + 12_{10} = 18_{10} = 12_{16}$
$7_{16} + A_{16} + 1_{16} = 7_{10} \times 10_{10} + 1_{10} = 18_{10} = 12_{16}$</td></tr>
</table>

d. Pembagian

Contoh :

Desimal	hexadesimal
27 / 4646 \ 172 27- 194 189 – 54 54 – 0	1B / 1214 \ AC 10E ← $1B_{16} x A_{16} = 27_{10} x 10_{10} = 270_{10} = 10E_{16}$ 144 144- ← $1B_{16} x C_{16} = 27_{10} x 10_{10} = 3240_{10}$ 0 $=144_{16}$

Konversi Bilangan

Konversi bilangan adalah suatu proses dimana satu Sistem bilangan dengan basis tertentu akan dijadikan bilangan dengan basis yang alian.

Konversi dari bilangan Desimal

1. Konversi dari bilangan Desimal ke biner
   Yaitu dengan cara membagi bilangan desimal dengan dua kemudian diambil sisa pembagiannya.

Contoh :

45 (10) = …..(2)

45 : 2 = 22 + sisa 1

22 : 2 = 11 + sisa 0

11 : 2 = 5 + sisa 1

5 : 2 = 2 + sisa 1

2 : 2 = 1 + sisa 0

101101(2) ditulis dari bawah ke atas

2. Konversi bilangan Desimal ke Oktal

   Yaitu dengan cara membagi bilangan desimal dengan 8 kemudian diambil sisa pembagiannya

   Contoh :

   385 (10) = ….(8)

   385 : 8 = 48 + sisa 1

   48 : 8 = 6 + sisa 0

   601 (8)

3. Konversi bilangan Desimal ke Hexadesimal

   Yaitu dengan cara membagi bilangan desimal dengan 16 kemudian diambil sisa pembagiannya

   Contoh :

   1583 (10) = ….(16)

   1583 : 16 = 98 + sisa 15

   96 : 16 = 6 + sisa 2

   62F (16)

Konversi dari Sistem bilangan Biner

1. Konversi ke desimal

   Yaitu dengan cara mengalikan masing-masing bit dalam bilangan dengan position valuenya.

   Contoh :

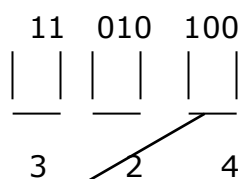
2. Konversi ke Oktal

   Dapat dilakukan dengan mengkonversikan tiap-tiap tiga buah digit biner yang dimulai dari bagian belakang.

   Contoh :

   11010100 (2) = ...(8)

   11 010 100

   3 2 4

diperjelas :

100 = 0×2^0 = 0

$0 \times 2^1 = 0$

$1 \times 2^2 = 4$

4

Begitu seterusnya untuk yang lain.

3. Konversi ke Hexademial

   Dapat dilakukan dengan mengkonversikan tiap-tiap empat buah digit biner yang dimulai dari bagian belakang.

   Contoh :

   11010100

   1101 0100

   D 4

Konversi dari Sistem bilangan Oktal

1. Konversi ke Desimal

   Yaitu dengan cara mengalikan masing-masing bit dalam bilangan dengan position valuenya.

Contoh :

$12_{(8)} = \ldots\ldots_{(10)}$

$2 \times 8^0 = 2$

$1 \times 8^1 = 8$

10

Jadi $10_{(10)}$

2. Konversi ke Biner

   Dilakukan dengan mengkonversikan masing-masing digit octal ke tiga digit biner.

   Contoh :

   6502 (8) ….. = (2)

   2 = 010

   0 = 000

   5 = 101

   6 = 110

   jadi 110101000010

3. Konversi ke Hexadesimal

Dilakukan dengan cara merubah dari bilangan octal menjadi bilangan biner kemudian dikonversikan ke hexadesimal.

Contoh :

2537 (8) = …..(16)

2537 (8) = 010101011111

010101010000(2) = 55F (16)

Konversi dari bilangan Hexadesimal

1. Konversi ke Desimal

Yaitu dengan cara mengalikan masing-masing bit dalam bilangan dengan position valuenya.

Contoh :

$C7_{(16)}$ = …… $_{(10)}$

$7 \times 16^{0} = 7$

$C \times 16^{1} = 192$

199

Jadi 199 $_{(10)}$

2. Konversi ke Oktal

Dilakukan dengan cara merubah dari bilangan hexadesimal menjadi biner terlebih dahulu kemudian dikonversikan ke octal.

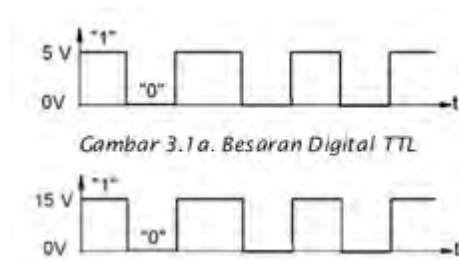
Contoh :

55F (16) = …..(8)

55F(16) = 010101011111(2)

010101011111 (2) = 2537 (8)

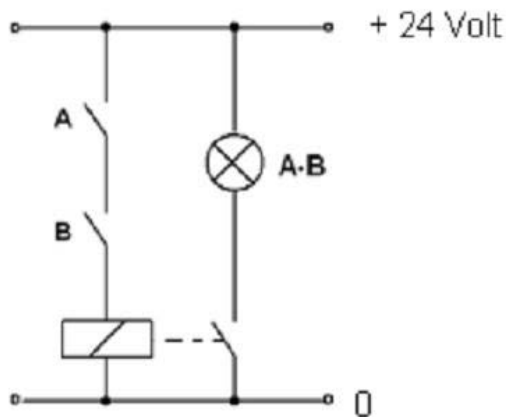
2. Pengertian Besaran Digital

Besaran digital adalah besaran yang terdiri dari besaran level tegangan *High* dan *Low*, atau dinyatakan dengan logika "1" dan "0". Level *high* adalah identik dengan tegangan "5 Volt" atau logika "1", sedang level low identik dengan tegangan "0 Volt" atau logika "0". Untuk sistem digital yang menggunakan C-MOS level yang digunakan adalah level tegangan "15 Volt" dan "0 Volt"

Gambar 2.33 Besaran Digital C-MOS

Sebagai gambaran perbedaan besaran digital dan analog adalah seperti penunjukan alat ukur. Alat ukur analog akan menunjukkan besaran analog, sedangkan alat ukur digital akan menunjukkan display angka yang disusun secara digital (7-segment).

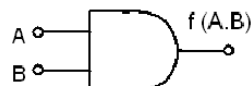
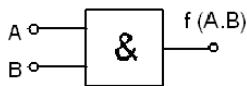
Gambar 2.34 Besaran Analog dan Besaran Digital

Gerbang AND

Gerbang dasar AND adalah ekivalen dengan dua buah saklar terbuka yang terpasang seri seperti terlihat pada gambar3. di bawah.

Gambar 2.35 Rangkaian listrik ekivalen AND

Rangkaian yang terdiri dari dua buah saklar A dan B, sebuah relay dan sebuah lampu. Lampu hanya akan menyala bila saklar A dan B dihubungkan (on). Sebaliknya lampu akan mati bila salah satu saklar atau semua saklar diputus (off). Sehingga bisa dirumuskan hanya akan terjadi keluaran "1" bila A="1" dan B="1".

Rangkaian listrik :

Simbol standar IEC standar USA

Gambar 2.36. Simbol gerbang AND

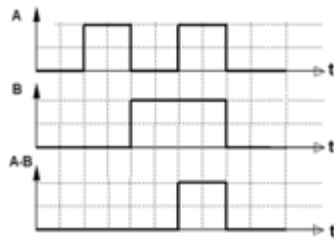
Fungsi persamaan dari gerbang AND

$f(A,B) = A\ B$

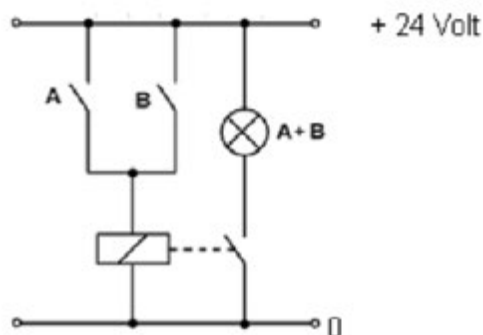
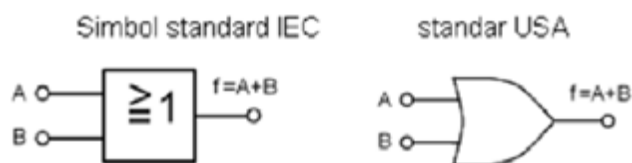
Tabel 1 Tabel kebenaran AND

B	A	Q=f(A,B)
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Diagram masukan-keluaran dari gerbang AND erlihat bahwa pada keluaran

akan memiliki logik high "1" bila semua masukan A dan B berlogik "1"

Gambar 2.37. Diagram masukan-keluaran gerbang AND

Gerbang OR

Gerbang dasar OR adalah ekivalen dengan dua buah saklar terbuka yang terpasang parallel / jajar seperti terlihat pada gambar 6 di bawah. Rangkaian terdiri dari dua buah saklar yang terpasang secara parallel, sebuah relay dan lampu. Lampu akan menyala bila salah satu atau ke dua saklar A dan B dihubungkan (on). Sebaliknya lampu hanya akan padam bila semua saklar A dan B diputus (off). Maka bisa dirumuskan bahwa akan terjadi keluaran "1" bila salah satu saklar A="1" atau B="1", dan akan terjadi keluaran "0" hanya bila saklar Rangkaian listrik : A="1" dan B="1".

Gambar 2.38. Rangkaian listrik ekivalen gerbang OR

Gambar 2.39. simbol gerbang OR

Fungsi dari gerbang OR adalah :

$f(A,B) = A + B$

Tabel 2. Tabel kebenaran OR

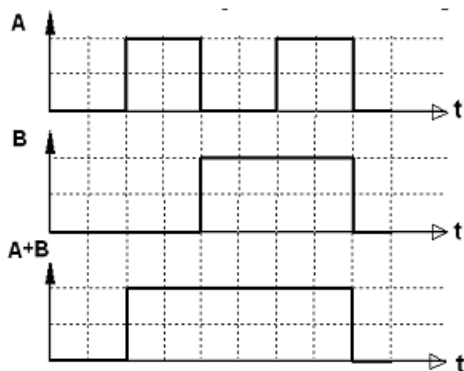
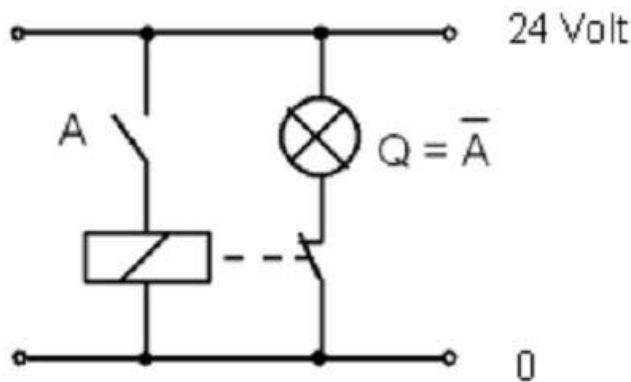
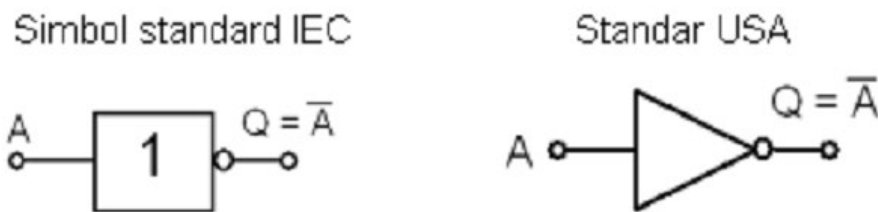
B	A	Q=f(A,B)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Gambar 2.40. Diagram masukan-keluaran gerbang OR

Diagram masukan-keluaran diperlihatkan seperti gambar di bawah. Pada keluaran A+B hanya akan memiliki logik low "0" bila semua masukan - masukannya A dan B memiliki logik "0".

Gerbang NOT Gerbang dasar NOT adalah rangkaian pembalik / inverter. Rangkaian ekivalennya adalah sebuah rangkaian listrik seperti gambar 3.8 di bawah. Bila saklar A dihubungkan (on), maka lampu akan mati. Sebaliknya bila

saklar A diputus (off), maka lampu akan menyala. Sehingga bisa disimpulkan bahwa akan terjadi keluaran Q="1" hanya bila masukan A="0". Rangkaian listrik :

Gambar 2.41 Rangkaian listrik ekivalen gerbang NOT

Simbol standard IEC

Gambar 2.42 Gambar symbol gerbang NOT

Fungsi persamaan dari gerbang NOT adalah:

$f(A)=\overline{A}$

Tabel 3. Tabel kebenaran NOT

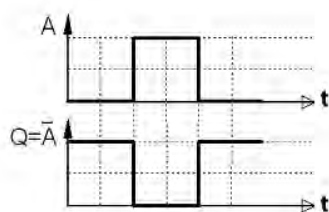
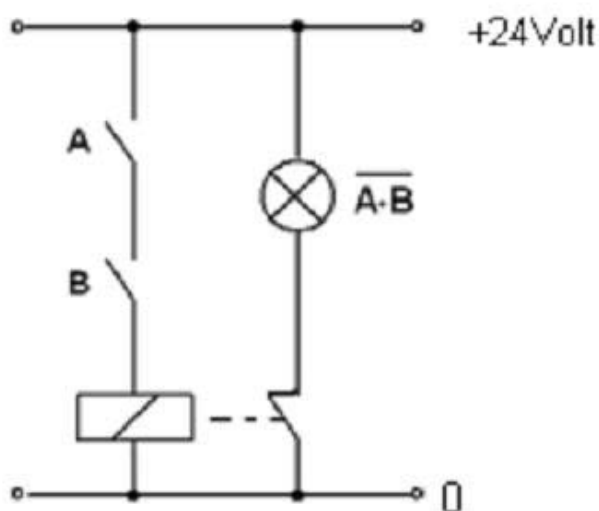
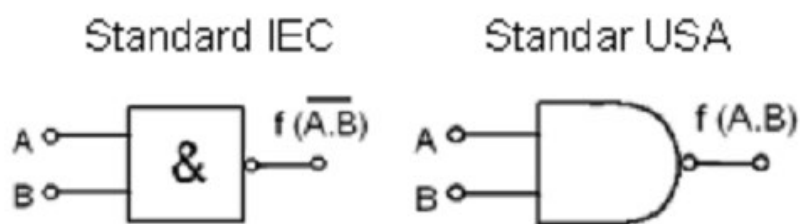
A	Q=Ā
0	1
1	0

Gambar 2.43 Diagram masukan-keluaran gerbang NOT

Diagram masukan-keluaran dari gerbang NOT seperti ditunjukkan pada gambar 11 di atas. Keluaran akan selalu memiliki kondisi logik yang berlawanan terhadap masukannya.

Gerbang NAND

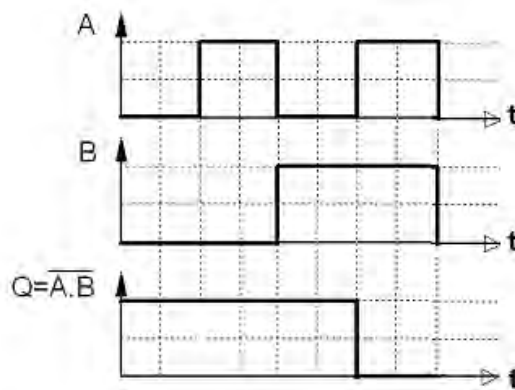
Gerbang dasar NAND adalah ekivalen dengan dua buah saklar terbuka yang terpasang seri. Akan terjadi keluaran Q="1" hanya bila A="0" dan B="0". Gerbang NAND sama dengan gerbang AND dipasang seri dengan gerbang NOT. Rangkaian listrik :

Gambar 2.44 Rangkaian listrik ekivalen gerbang NAND

Gambar 2.45 Gambar symbol gerbang NAND

Fungsi persamaan gerbang NAND

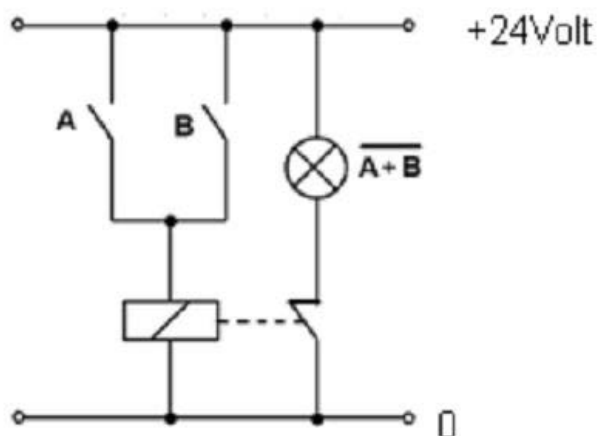
f(A,B)=BA

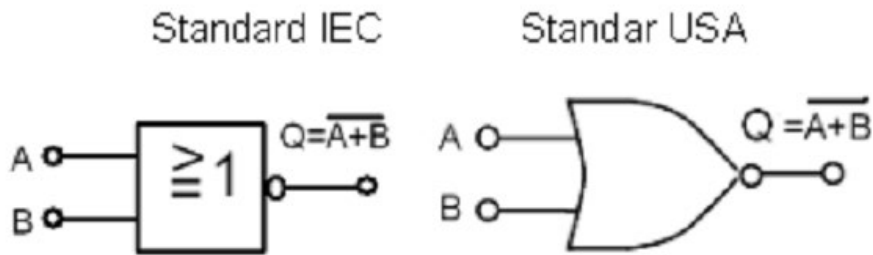
Tabel 4 Tabel kebenaran NAND

B	A	Q=f(A,B)
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Diagram masukan-keluaran dari gerbang NAND, keluaran memiliki logik "0" hanya bila ke dua masukannya berlogik "1"

Gambar 2.46 Diagram masukan-keluaran gerbang NAND

Gerbang NOR

Gerbang dasar NOR adalah ekivalen dengan dua buah saklar terbuka yang terpasang parallel / jajar.

Gambar 2.47 Rangkaian listrik ekivalen gerbang NOR

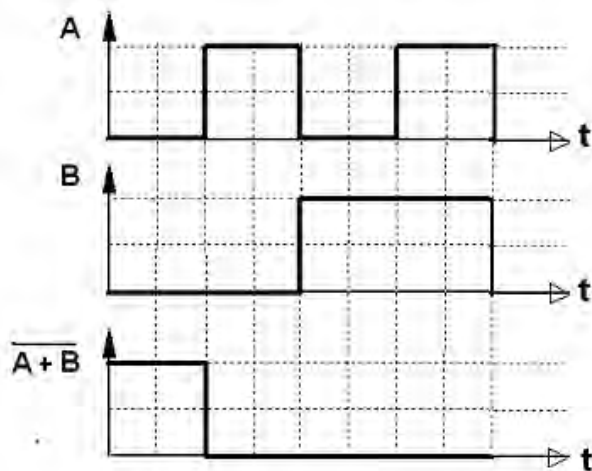
Akan terjadi keluaran “1” bila semua saklar A=”0” atau B=”0”. Gerbang NOR sama dengan gerbang OR dipasang seri dengan gerbang NOT.

Gambar 2.48 Gerbang NOR

Fungsi persamaan gerbang NOR

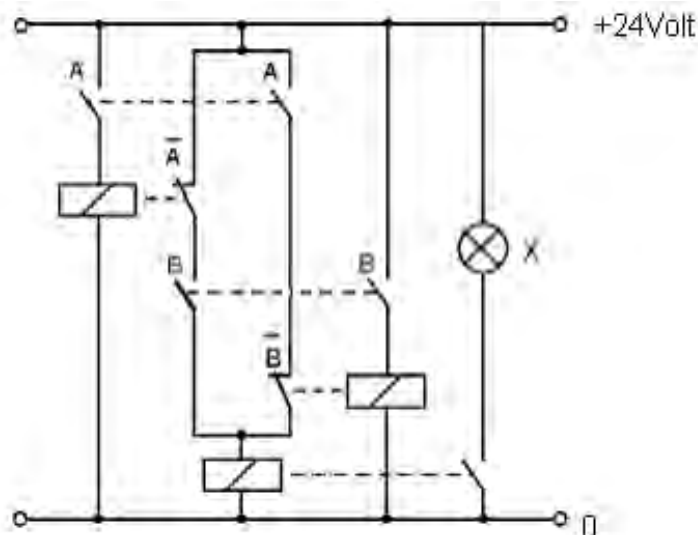
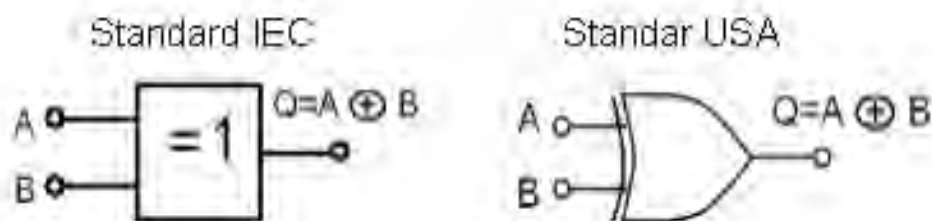
f(A,B)= BA

Tabel 5. Tabel kebenaran NOR

B	A	Q=f(A.B)
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Diagram masukan keluaran seperti terlihat pada gambar di bawah. Keluaran hanya akan memiliki logik „1“, bila semua masukannya berlogik “0”

Gambar 2.49 Diagram masukan-keluaran gerbang NOR

Exclusive OR (EX-OR)

Gerbang EX-OR sering ditulis dengan X-OR adalah gerbang yang paling sering dipergunakan dalam teknik komputer. Gerbang EX-OR hanya akan memiliki keluaran Q="1" bila masukan-masukan A dan B memiliki kondisi berbeda. Pada gambar 3.19 yang merupakan gambar rangkaian listrik ekivalen EX-OR diperlihatkan bahwa bila saklar A dan B masing-masing diputus (off), maka lampu akan mati. Bila saklar A dan B masing-masing dihubungkan (on), maka lampu juga mati. Bila saklar A dihubungkan (on) sedangkan saklar B diputus (off), maka lampu akan menyala. Demikian pula sebaliknya bila saklar A diputus (off) dan saklar B dihubungkan (on) maka lampu akan menyala. Sehingga bisa disimpulkan bahwa lampu akan menyala hanya bila kondisi saklar A dan B berlawanan. Tanda dalam pelunilsa EX-OR adalah dengan tanda

Gambar 2.50 Rangkaian listrik ekivalen gerbang EX-OR

Gambar 2.51. Simbol gerbang EX-OR

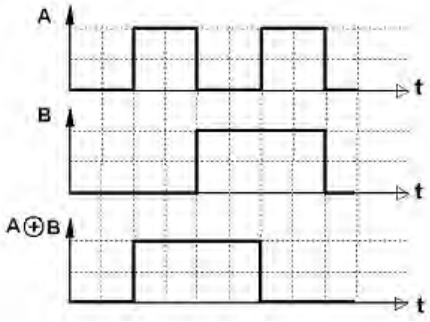
Fungsi persamaan gerbang EX-OR

BABABAB)f(A,   (3.12)

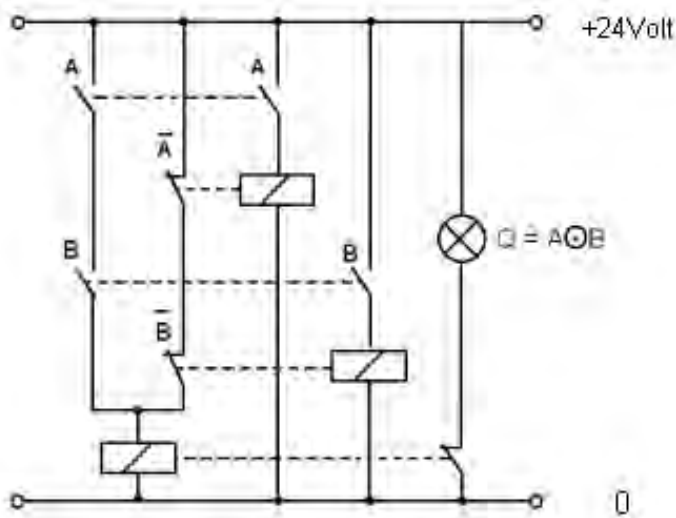
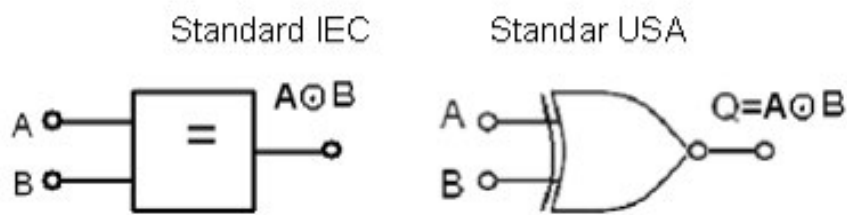
Tabel 6 Tabel kebenaran EX-OR

B	A	Q=f(A,B)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Diagram masukan keluaran dari gerbang EX-OR seperti terlihat pada gambar di bawah.

Keluaran hanya akan memiliki logik "1" bila masukan-masukannya memiliki kondisi logik berlawanan.

Gambar 2.52 Diagram masukan-keluaran gerbang EX-OR

Gerbang EX-NOR (Exlusive-NOR)

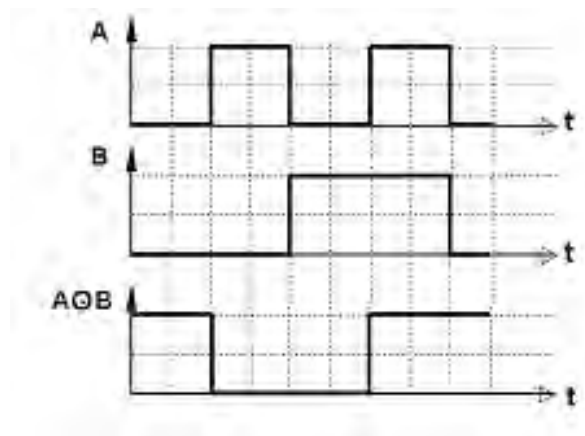
Pada gambar 21 adalah rangkaian listrik ekivalen dengan gerbang EX-NOR. Bila saklar A dan B masing-masing dihubungkan (on) atau diputus (off) maka lampu akan menyala. Namun bila saklar A dan B dalam kondisi yang berlawanan, maka lampu akan mati.Sehingga bisa disimpulkan bahwa gerbang EX-NOR hanya akan memiliki keluaran Q="1" bila masukan-masukan A dan B memiliki kondisi yang sama. Rangkaian listrik :

Gambar 2.53 Rangkaian listrik ekivalen gerbang EX-NOR

Gambar 2.54 Simbol gerbang EX-NOR

Fungsi persamaan gerbang EX-NOR f(A,B)=

ABAB =A B

Tabel 7. Tabel kebenaran gerbang EX=NOR

B	A	Q=f(A,B)
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Diagram masukan keluaran dari gerbang EX-NOR seperti terlihat pada gambar di bawah. Keluaran hanya akan memiliki logik "1" bila masukan-masukannya memiliki kondisi logik sama, logik "0" maupun logik "1".

Gambar 2.55 Diagram masukan-keluaran gerbang EX-NOR

3. Aljabar Boolean

Aljabar boolean merupakan aljabar yang berhubungan dengan variabel-variabel biner dan operasi-operasi logik. Variabel-variabel diperlihatkan dengan huruf-huruf alfabet, dan tiga operasi dasar dengan AND, OR dan NOT (komplemen). Fungsi boolean terdiri dari variabel-variabel biner yang menunjukkan fungsi, suatu tanda sama dengan, dan suatu ekspresi aljabar yang dibentuk dengan menggunakan variabel-variabel biner, konstanta-konstanta 0 dan 1, simbol-simbol operasi logik, dan tanda kurung.

Suatu fungsi boolean bisa dinyatakan dalam tabel kebenaran. Suatu tabel kebenaran untuk fungsi boolean merupakan daftar semua kombinasi angka-angka biner 0 dan 1 yang diberikan ke variabel-variabel biner dan daftar yang memperlihatkan nilai fungsi untuk masing-masing kombinasi biner.

Aljabar boolean mempunyai 2 fungsi berbeda yang saling berhubungan. Dalam arti luas, aljabar boolean berarti suatu jenis simbol-simbol yang ditemukan oleh George Boole untuk memanipulasi nilai-nilai kebenaran logika secara aljabar. Dalam hal ini aljabar boolean cocok untuk

diaplikasikan dalam komputer. Disisi lain, aljabar boolean juga merupakan suatu struktur aljabar yang operasi-operasinya memenuhi aturan tertentu.

4. Dasar Operasi Logika

LOGIKA :

Memberikan batasan yang pasti dari suatu keadaan, sehingga suatu keadaan tidak dapat berada dalam dua ketentuan sekaligus.

Dalam logika dikenal aturan sbb :

- ♦ Suatu keadaan tidak dapat dalam keduanya benar dan salah sekaligus
- ♦ Masing-masing adalah benar / salah.
- ♦ Suatu keadaan disebut benar bila tidak salah.

Dalam ajabar boolean keadaan ini ditunjukkan dengan dua konstanta : LOGIKA '1' dan '0'

Operasi-operasi dasar logika dan gerbang logika :

Pengertian GERBANG (GATE) :

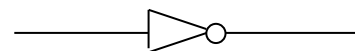
- ♦ Rangkaian satu atau lebih sinyal masukan tetapi hanya menghasilkan satu sinyal keluaran.
- ♦ Rangkaian digital (dua keadaan), karena sinyal masukan atau keluaran hanya berupa tegangan tinggi atau low (1 atau 0).
- ♦ Setiap keluarannya tergantung sepenuhnya pada sinyal yang diberikan pada masukan-masukannya.

Operasi logika NOT (Invers)

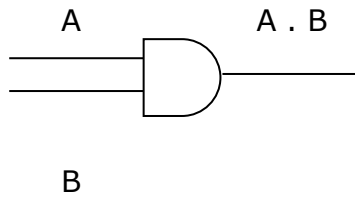
Operasi merubah logika 1 ke 0 dan sebaliknya → x = x'

Tabel Operasi NOT

X	X'
0	1
1	0

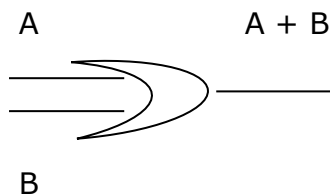
Simbol

Operasi logika AND

- Operasi antara dua variabel (A,B)
- Operasi ini akan menghasilkan logika 1, jika kedua variabel tersebut berlogika 1

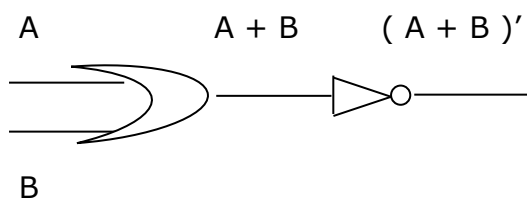
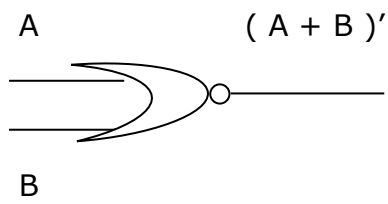
Simbol

Operasi logika OR

Operasi antara 2 variabel (A,B)

Operasi ini akan menghasilkan logika 0, jika kedua variabel tersebut berlogika 0.

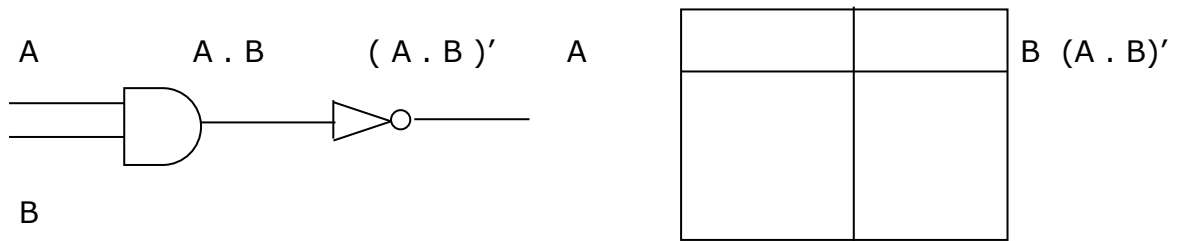
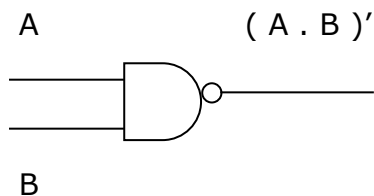
Simbol

Operasi logika NOR

Operasi ini merupakan operasi OR dan NOT, keluarannya merupakan keluaran operasi OR yang di inverter.

Simbol

Atau

Operasi logika NAND

Operasi logika ini merupakan gabungan operasi AND dan NOT, Keluarannya merupakan keluaran gerbang AND yang di inverter.

Simbol

Atau

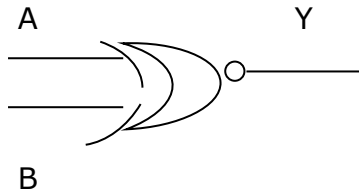
Operasi logika EXOR

akan menghasilkan keluaran ‘1’ jika jumlah masukan yang bernilai ‘1’ berjumlah ganjil.

Simbol

Operasi logika EXNOR

Operasi ini akan menghasilkan keluaran '1' jika jumlah masukan yang bernilai '1' berjumlah genap atau tidak ada sama sekali.

Simbol

DALIL BOOLEAN ;

1. X=0 ATAU X=1
2. 0 . 0 = 0
3. 1 + 1 = 1
4. 0 + 0 = 0
5. 1 . 1 = 1
6. 1 . 0 = 0 . 1 = 0
7. 1 + 0 = 0 + 1 = 0

TEOREMA BOOLEAN

1. HK. KOMUTATIF

   A + B = B + A

   A . B = B . A

2. HK. ASSOSIATIF

   (A+B)+C = A+(B+C)

   (A.B) . C = A . (B.C)

3. HK. DISTRIBUTIF

   A . (B+C) = A.B + A.C

   A + (B.C) = (A+B) . (A+C)

6. HK. IDENTITAS

   A + A = A

   A . A = A

7.

   0 + A = A ----- 1. A = A

   1 + A = 1 ----- 0 . A = 0

8.

   A' + A = 1

   A' . A =0

4. HK. NEGASI

$(A') = A'$

$(A')' = A$

5. HK. ABRSORPSI

$A + A.B = A$

$A.(A+B) = A$

9.

$A + A' . B = A + B$

$A . (A + B) = A . B$

10. DE MORGAN'S

$(A + B)' = A' . B'$

$(A . B)' = A' + B'$

CONTOH :

1. $A + A . B' + A' . B = A . (1 + B') + A' . B$

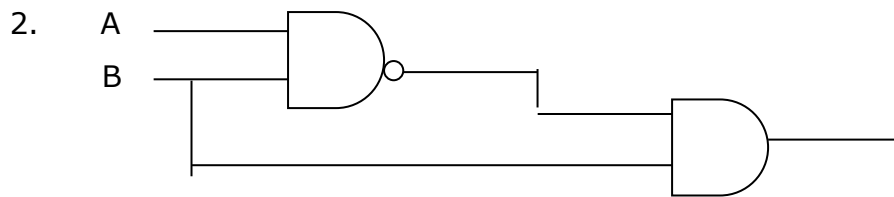
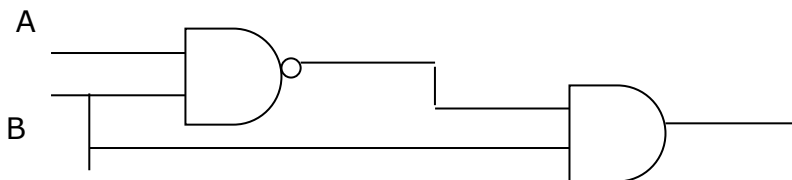
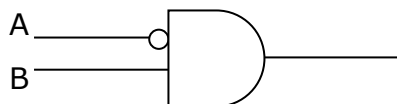
$= A . 1 + A' . B$

$= A + A' . B$

$= A + B$

2.

$X = (A.B)' . B \qquad = (A' + B') . B$

$= A'.B$

ATAU

- **Misalkan terdapat**
  - Dua operator biner: + dan $\cdot$
  - Sebuah operator uner: ’.
  - B : himpunan yang didefinisikan pada opeartor +, $\cdot$, dan ’
  - 0 dan 1 adalah dua elemen yang berbeda dari B.

Tupel

$(B, +, \cdot, ')$

disebut **aljabar Boolean** jika untuk setiap a, b, $c \in B$ berlaku aksioma-aksioma atau postulat Huntington berikut:

a. *Closure*: (i) $a + b \in B$

(ii) $a \cdot b \in B$

b. Identitas: (i) $a + 0 = a$

(ii) $a \cdot 1 = a$

c. Komutatif: (i) $a + b = b + a$

(ii) $a \cdot b = b \, . \, a$

d. Distributif: (i) $a \cdot (b + c) = (a \cdot b) + (a \cdot c)$

(ii) $a + (b \cdot c) = (a + b) \cdot (a + c)$

e. Komplemen: (i) $a + a' = 1$

(ii) $a \cdot a' = 0$

- Untuk mempunyai sebuah aljabar Boolean, harus diperlihatkan:
  1. Elemen-elemen himpunan *B*,
  2. Kaidah operasi untuk operator biner dan operator uner,
  3. Memenuhi postulat Huntington.

Aljabar Boolean Dua-Nilai

Aljabar Boolean dua-nilai:

- $B = \{0, 1\}$
- operator biner, + dan ·
- operator uner, ’
- Kaidah untuk operator biner dan operator uner:

a	*B*	*a* · *b*
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

a	*b*	*a* + *b*
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

a	*a*’
0	1
1	0

Cek apakah memenuhi postulat Huntington:

1) *Closure* : jelas berlaku
2) Identitas: jelas berlaku karena dari tabel dapat kita lihat bahwa:

   (i) $0 + 1 = 1 + 0 = 1$

   (ii) $1 \cdot 0 = 0 \cdot 1 = 0$

3) Komutatif: jelas berlaku dengan melihat simetri tabel operator biner.

4) Distributif: (i) $a \cdot (b + c) = (a \cdot b) + (a \cdot c)$ dapat ditunjukkan benar dari tabel operator biner di atas dengan membentuk tabel kebenaran:

a	b	c	$b + c$	$a \cdot (b + c)$	$a \cdot b$	$a \cdot c$	$(a \cdot b) + (a \cdot c)$
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	0	1	1
1	1	0	1	1	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1

(ii) Hukum distributif $a + (b \cdot c) = (a + b) \cdot (a + c)$ dapat ditunjukkan benar dengan membuat tabel kebenaran dengan cara yang sama seperti (i).

5) Komplemen: jelas berlaku karena Tabel 7.3 memperlihatkan bahwa:

(i) $a + a' = 1$, karena $0 + 0' = 0 + 1 = 1$ dan $1 + 1' = 1 + 0 = 1$

(ii) $a \cdot a = 0$, karena $0 \cdot 0' = 0 \cdot 1 = 0$ dan $1 \cdot 1' = 1 \cdot 0 = 0$

Karena kelima postulat Huntington dipenuhi, maka terbukti bahwa $B = \{0, 1\}$ bersama-sama dengan operator biner + dan · operator komplemen ‘ merupakan aljabar Boolean.

Ekspresi Boolean

- Misalkan (B, +, ·, ′) adalah sebuah aljabar Boolean. Suatu ekspresi Boolean dalam (B, +, ·, ′) adalah:

  (i) setiap elemen di dalam B,

  (ii) setiap peubah,

  (iii) jika e_1 dan e_2 adalah ekspresi Boolean, maka $e_1 + e_2$, $e_1 \cdot e_2$, e_1' adalah ekspresi Boolean

Contoh:

0

1

a

b

c

$a + b$

$a \cdot b$

$a' \cdot (b + c)$

$a \cdot b' + a \cdot b \cdot c' + b'$, dan sebagainya

Mengevaluasi Ekspresi Boolean

Contoh: $a' \cdot (b + c)$

jika $a = 0$, $b = 1$, dan $c = 0$, maka hasil evaluasi ekspresi:

$0' \cdot (1 + 0) = 1 \cdot 1 = 1$

- Dua ekspresi Boolean dikatakan **ekivalen** (dilambangkan dengan '=') jika keduanya mempunyai nilai yang sama untuk setiap pemberian nilai-nilai kepada n peubah.

  Contoh:

  $$a \cdot (b + c) = (a . b) + (a \cdot c)$$

Contoh: Perlihatkan bahwa $a + a'b = a + b$.

Penyelesaian:

a	b	a'	$a'b$	$a + a'b$	$a + b$
0	0	1	0	0	0
0	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1
1	1	0	0	1	1

- Perjanjian: tanda titik (·) dapat dihilangkan dari penulisan ekspresi Boolean, kecuali jika ada penekanan:

  (i) $a(b + c) = ab + ac$

  (ii) $a + bc = (a + b) (a + c)$

  (iii) $a \cdot 0$, bukan a0

Prinsip Dualitas

- Misalkan S adalah kesamaan (*identity*) di dalam aljabar Boolean yang melibatkan operator +, ·, dan komplemen, maka jika pernyataan S^* diperoleh dengan cara mengganti

  · dengan +

$+$ dengan $\cdot$

0 dengan 1

1 dengan 0

dan membiarkan operator komplemen tetap apa adanya, maka kesamaan S^* juga benar. S^* disebut sebagai *dual* dari S.

Contoh:

(i) $(a \cdot 1)(0 + a') = 0$ dualnya $(a + 0) + (1 \cdot a') = 1$

(ii) $a(a' + b) = ab$ dualnya $a + a'b = a + b$

Hukum-hukum Aljabar Boolean

1. Hukum identitas: (i) $a + 0 = a$ (ii) $a \cdot 1 = a$	2. Hukum idempoten: (i) $a + a = a$ (ii) $a \cdot a = a$
3. Hukum komplemen: (i) $a + a' = 1$ (ii) $aa' = 0$	4. Hukum dominansi: (i) $a \cdot 0 = 0$ (ii) $a + 1 = 1$
5. Hukum involusi: (i) $(a')' = a$	6. Hukum penyerapan: (i) $a + ab = a$ (ii) $a(a + b) = a$
7. Hukum komutatif: (i) $a + b = b + a$ (ii) $ab = ba$	8. Hukum asosiatif: (i) $a + (b + c) = (a + b) + c$ (ii) $a (b c) = (a b) c$
9. Hukum distributif: (i) $a + (b c) = (a + b) (a + c)$ (ii) $a (b + c) = a b + a c$	10. Hukum De Morgan: (i) $(a + b)' = a'b'$ (ii) $(ab)' = a' + b'$

11. Hukum 0/1 (i) $0' = 1$ (ii) $1' = 0$	

Contoh: Buktikan (i) $a + a'b = a + b$ dan (ii) $a(a' + b) = ab$

Penyelesaian:

(i) $a + a'b = (a + ab) + a'b$ (Penyerapan)

$= a + (ab + a'b)$ (Asosiatif)

$= a + (a + a')b$ (Distributif)

$= a + 1 \bullet b$ (Komplemen)

$= a + b$ (Identitas)

(ii) adalah dual dari (i)

Fungsi Boolean

- **Fungsi Boolean** (disebut juga fungsi biner) adalah pemetaan dari B^n ke B melalui ekspresi Boolean, kita menuliskannya sebagai

  $f : B^n \rightarrow B$

  yang dalam hal ini B^n adalah himpunan yang beranggotakan pasangan terurut ganda-n (*ordered n-tuple*) di dalam daerah asal B.

- Setiap ekspresi Boolean tidak lain merupakan fungsi Boolean.

- Misalkan sebuah fungsi Boolean adalah

  $f(x, y, z) = xyz + x'y + y'z$

  Fungsi f memetakan nilai-nilai pasangan terurut ganda-3

  (x, y, z) ke himpunan $\{0, 1\}$.

  Contohnya, (1, 0, 1) yang berarti $x = 1$, $y = 0$, dan $z = 1$

  sehingga $f(1, 0, 1) = 1 \cdot 0 \cdot 1 + 1' \cdot 0 + 0' \cdot 1 = 0 + 0 + 1 = 1$.

Contoh: Contoh-contoh fungsi Boolean yang lain:

1. $f(x) = x$
2. $f(x, y) = x'y + xy' + y'$
3. $f(x, y) = x' y'$
4. $f(x, y) = (x + y)'$
5. $f(x, y, z) = xyz'$
   - Setiap peubah di dalam fungsi Boolean, termasuk dalam bentuk komplemennya, disebut **literal**.

     Contoh: Fungsi $h(x, y, z) = xyz'$ pada contoh di atas terdiri dari 3 buah literal, yaitu x, y, dan z'.

Contoh: Diketahui fungsi Booelan $f(x, y, z) = xy\,z'$, nyatakan h dalam tabel kebenaran.

Penyelesaian:

x	y	z	$f(x, y, z) = xy\,z'$
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

Komplemen Fungsi

1) Cara pertama: menggunakan hukum De Morgan

   Hukum De Morgan untuk dua buah peubah, x_1 dan x_2, adalah

Contoh. Misalkan $f(x, y, z) = x(y'z' + yz)$, maka

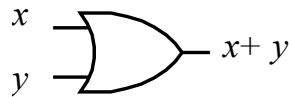
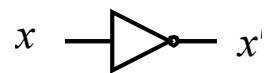
$f'(x, y, z) = (x(y'z' + yz))'$

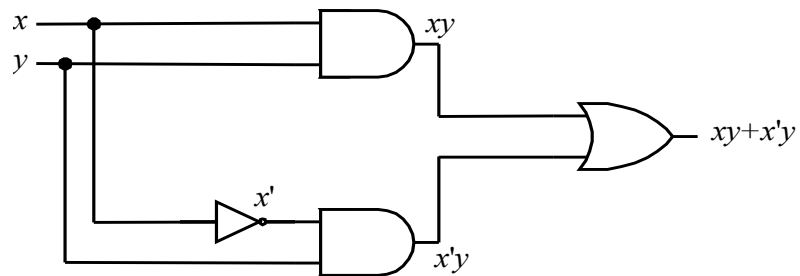
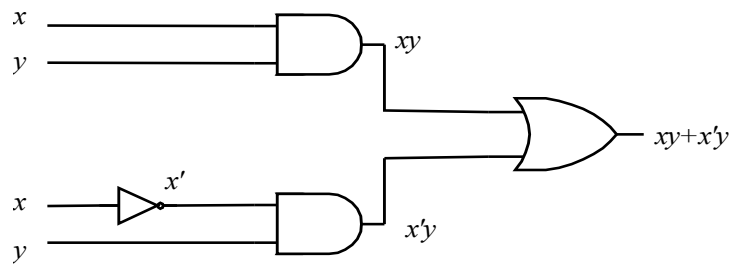
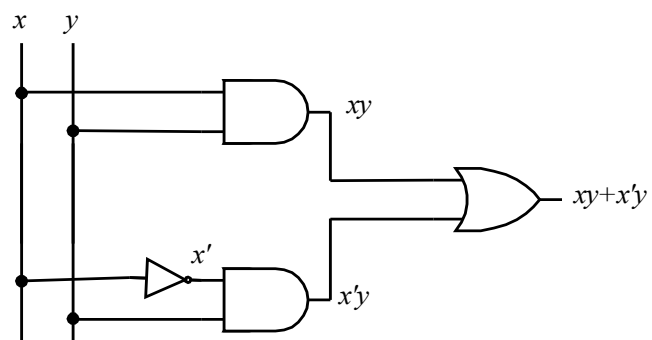
$= x' + (y'z' + yz)'$

$= x' + (y'z')' (yz)'$

$\mathbf{= x' + (y + z) (y' + z')}$

Aplikasi Aljabar Boolean

2. Rangkaian Digital Elektronik

Gerbang AND Gerbang OR Gerbang NOT (*inverter*)

Contoh. Nyatakan fungsi $f(x, y, z) = xy + x'y$ ke dalam rangkaian logika.

Jawab: (a) Cara pertama

(b) Cara kedua

(c) Cara ketiga

Gerbang turunan

Gerbang NAND

Gerbang XOR

x, y → $(x+y)'$

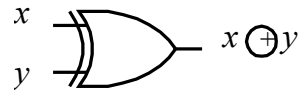
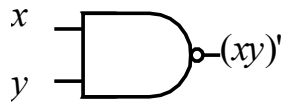
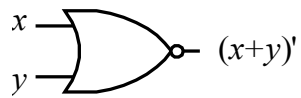
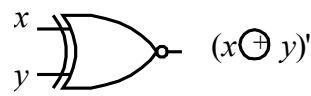
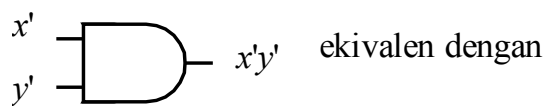
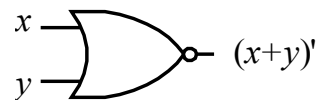
Gerbang NOR

x, y → $(x \oplus y)'$

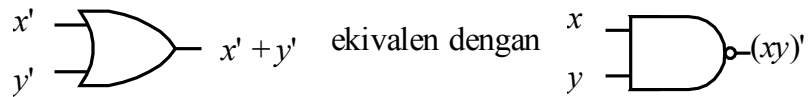
Gerbang XNOR

x, y → $(x + y)'$ ekivalen dengan x, y → $x + y$ → $(x + y)'$

x, y → $(x+y)'$

x', y' → $x'y'$ ekivalen dengan

Penyederhanaan Fungsi Boolean

Contoh: $f(x, y) = x'y + xy' + y'$

x', y' → $x' + y'$ ekivalen dengan x, y → $(xy)'$

disederhanakan menjadi

$f(x, y) = x' + y'$

Penyederhanaan fungsi Boolean dapat dilakukan dengan 3 cara:

1. Secara aljabar
2. Menggunakan Peta Karnaugh
3. Menggunakan metode Quine Mc Cluskey (metode Tabulasi)

2). Penyederhanaan Secara Aljabar

Contoh:

1. $f(x, y) = x + x'y$

   $= (x + x')(x + y)$

   $= 1 \cdot (x + y)$

   $= x + y$

2. $f(x, y, z) = x'y'z + x'yz + xy'$

   $= x'z(y' + y) + xy'$

   $= x'z + xz'$

3. $f(x, y, z) = xy + x'z + yz = xy + x'z + yz(x + x')$

$= xy + x'z + xyz + x'yz$

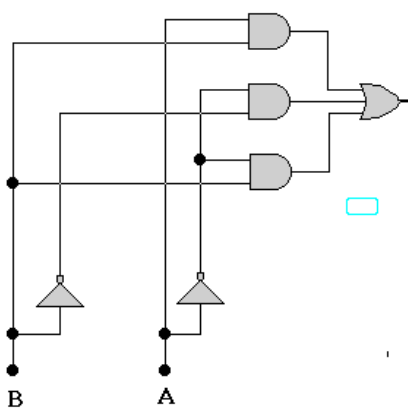
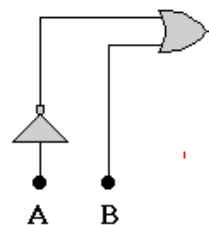
$= xy(1 + z) + x'z(1 + y) = xy + x'z$

Teknik Minimasi

Teknik minimisasi dalam ilmu digital adalah suatu teknik yang digunakan untuk menyederhanakan suatu persamaan logika. Mengapa suatu persamaan logika perlu disederhanakan?

Suatu persamaan logika perlu disederhanakan agar jika persamaan logika itu kita buat menjadi sebuah rangkaian logika kita bisa ;

- Mengurangi jumlah komponen yang digunakan
- Mengurangi jumlah biaya yang diperlukan
- Mempersingkat waktu untuk merangkai
- Menghasilkan respon rangkaian lebih cepat karena delay rangkaian berkurang
- Memperkecil dimensi fisik rangkaian
- Menganalisa rangkaian dengan mudah

Berikut adalah contoh rangkaian yang belum diminimisasi dan rangkaian yang sudah diminimisasi.

Sebelum diminimisasi sesudah diminimisasi

Bagaimanakah cara menyederhanakan persamaan logika?

Berikut beberapa metoda untuk menyederhanakan persamaan suatu logika diantaranya ;

- Aljabar Boolean
- Diagram Venn
- Karnaugh Map
- Quinne -Mc.Cluskey

Teorema Aljabar Boolean

Aljabar Boolean sangat penting peranannya di dalam proses perancangan maupun analisis rangkaian logika. Untuk memperoleh hasil rancangan yang berupa suatu persamaan logika yang siap diimplementasikan, diperlukan tahap pemberlakuan kaidah-kaidah perancangan. Salah satunya adalah aljabar Boolean. Aljabar Boolean merupakan aljabar yang diberlakukan pada variabel yang bersifat diskrit, dan oleh karena itu, aljabar ini cocok diberlakukan pada variabel yang ada pada rangkaian logika. Terdapat 2 jenis teorema aljabar Boolean yakni teorema variabel tunggal dan teorema variabel jamak. Setiap teorema baik yang bersifat tunggal maupun jamak selalu memiliki teorema rangkapnya.

a. Sifat Idempoten (sama)
   - $X + X = X$
   - $X \bullet X = X$

b. Sifat Absorpsi (menghilanghkan)
   - $X + (X \bullet Y) = X$
   - $X \bullet (X + Y) = X$

c. Teorema Identitas
   - $X + Y = Y$
   - $X \bullet Y = Y$

   (Jika $X = Y$)

d. Teorema Komplemen

- Jika $X + Y = 1$, atau
- Jika $X \bullet Y = 0$,

  Maka $X = \overline{Y}$

e. Teorema Involution

- $X = \overline{\overline{X}}$

f. Teorema Van De Morgan

- $\overline{X + Y + Z} = \overline{X} \bullet \overline{Y} \bullet \overline{Z}$
- $\overline{X \bullet Y \bullet Z} = \overline{X} + \overline{Y} + \overline{Z}$

2. Postulate Huntington

a. Postulate 1

- $X + 0 = X \rightarrow X \bullet 1 = X$
- $X \bullet 0 = 0 \rightarrow X + 1 = 1$

b. Postulate 2

- $X + Y = Y + X$
- $X \bullet Y = Y \bullet X$

c. Postulate 3

- $X \bullet (Y + Z) = (X \bullet Y) + (X \bullet Z)$
- $X + (Y \bullet Z) = (X + Y) \bullet (X + Z)$

d. Postulate 4

- $X + (Y + Z) = (X + Y) + Z$
- $X \bullet (Y \bullet Z) = (X \bullet Y) \bullet Z$

e. Postulate 5

- $\overline{X} + X = 1$
- $\overline{X} \bullet X = 0$

Diagram Venn

Salah satu cara untuk memudahkan untuk melukiskan hubungan antara variable dalam aljabar boolean adalah dengan menggunakan diagram venn. Diagram ini terdiri dari sebuah segi empat yang didalamnya dilukis lingkaran-lingkaran yang mewakili variabelnya, satu lingkaran untuk setiap variabelnya. Masing-masing lingkaran itu diberi nama menurut variable yang diwakilinya. Ditentukan bahwa semua titik diluar lingkaran itu tidak dimiliki oleh variable tersebut. Misalnya lingkaran dengan nama *A,* jika dalam lingkaran itu dikatakan bernilai 1, maka diluar a dikatakan bernilai 0. untuk dua lingkaran yang bertumpang tindih, terdapat empat daerah dalam segiempat tersebut.

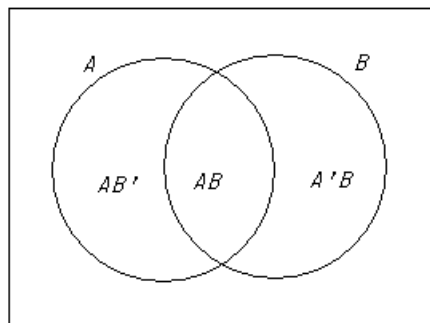
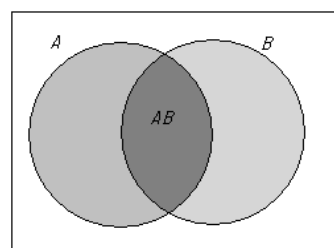
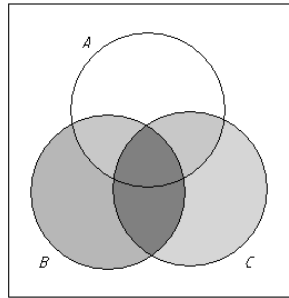



Diagram venn dapat digunakan untuk melukiskan postulate aljabar boole atau untuk membuktikan berlakunya aljabar Boolean. Gambar berikut menunjukan bahwa daerah yang dimiliki oleh *AB* terletak dalam lingkaran *A* sehingga *A+AB = A.*

Gambar berikut ,menunjukan hukum distributive *A(B+C) = AB+AC*

Dalam lingkaran itu tampak tiga lingkaran yang bertumpang tindih, satu untuk masing-masing variable A, B dan C. dengan demikian dimungkinkan untuk membedakan delapan daerah yang terpisah dalam diagram venn dengan variable itu. Dalam hal ini hokum distributiv dibuktikan dengan menunjukan bahwa daerah yang memotong lingkaran *A* dengan daerah yang meliputi *B* atau *C* adalah daerah yang sama yang dimiliki oleh *AB* atau *A.*

Karnaugh Map

Aturan penyederhanaan persamaan logika dengan K-map ;

a. Untuk persamaan logika yang terdiri dari n variable diperlukan K-map dengan 2^n kotak. Penomoran kotak berurutan berdasarkan kode gray.

	$\overline{D}\overline{E}\overline{F}$	$\overline{D}\overline{E}F$	$\overline{D}EF$	$\overline{D}E\overline{F}$	$DE\overline{F}$	DEF	$D\overline{E}F$	$D\overline{E}\overline{F}$
$\overline{A}\overline{B}\overline{C}$								
$\overline{A}\overline{B}C$								
$\overline{A}BC$								
$\overline{A}B\overline{C}$								
$AB\overline{C}$								
ABC								
$A\overline{B}C$								
$A\overline{B}\overline{C}$								

6 VARIABEL

b. Memasukan data dari truth table ke dalam K-map

	$\overline{C}\overline{D}$	$\overline{C}D$	CD	$C\overline{D}$
$\overline{A}\overline{B}$	0	0	1	0
$\overline{A}B$	1	1	1	1
AB	1	1	0	0
$A\overline{B}$	0	0	0	0

A	B	C	D	F
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

c. Penyederhanaan dilakukan dengan menggabungkan kotak-kotak yang bersebelahan dengan anggota sebanyak 2^m kotak dan formasi kotak membentuk segi empat ($0 \leq m \leq n$).
d. Setiap kelompok dalam K-map akan membentuk satu suku dalam persamaan hasil penyederhanaan, dan jumlah variabel yang terkandung dalam suatu suku tergantung kepada jumlah kotak/daerah dalam suatu kelompok
e. Dalam K-map dengan n variabel, suatu kelompok yang memiliki 2^m kotak merupakan suatu suku dengan (n-m) variabel.
f. Jumlah kelompok (group) dalam suatu K-map harus dibuat seminimal mungkin.
g. Jumlah anggota (kotak) dalam suatu kelompok harus dibuat semaksimal mungkin

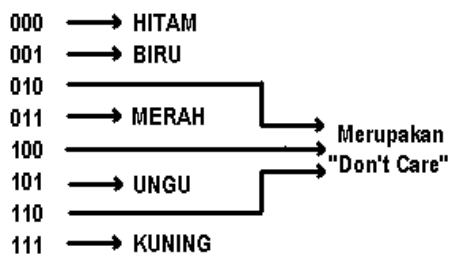
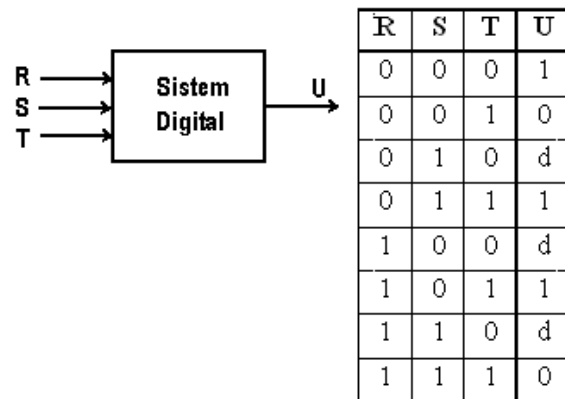
	$\overline{C}\overline{D}$	$\overline{C}D$	CD	$C\overline{D}$
$\overline{A}\overline{B}$	0	0	1	0
$\overline{A}B$	1	1	1	1
AB	1	1	0	0
$A\overline{B}$	0	0	0	0

h. Proses pengelompokan dilakukan sampai seluruh kotak yang berlogik 1 tergabung dalam pengelompokan.

Don't care adalah Kombinasi input yang tidak pernah digunakan, tidak dipakai dalam sistem.

Contoh:

Don't care pada K-map 3 variabel (8 kombinasi warna input tetapi hanya 5 warna yang digunakan)

R	S	T	U
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	d
0	1	1	1
1	0	0	d
1	0	1	1
1	1	0	d
1	1	1	0

d = don’t care

	$\bar{S}\bar{T}$	$\bar{S}T$	ST	$S\bar{T}$
$\bar{R}$	1	0	1	d
R	d	1	0	d

Don’t care boleh dibuat logik 1 atau logik 0 tergantung pada posisi yang menguntungkan

Pada M-map diatas nilai d lebih menguntungkan jika berlogik 1

	$\bar{S}\bar{T}$	$\bar{S}T$	ST	$S\bar{T}$
$\bar{R}$	1	0	1	1
R	1	1	0	1

$$U = \bar{T} + R\bar{S} + \bar{R}S$$

$$U = \bar{T} + (R \oplus S)$$

Metoda Quine - Mc. Cluskey

Untuk menyederhanakan suatu persamaan logika empat variable, K-map memang metode yang paling efektif. Akan tetapi jika persamaan itu lebih dari empat variable metode ini akan mengalami kesulitan. Metode Quine Mc. Cluskey adalh salah satu cara yang memungkinkan untuk menyederhanakan suatu persamaan logika lebih dari empat variable.

Berikut langkah-langkahnya ;

Bila diberikan persamaan logika $F = \Sigma(0,3,7,8,9,13)$

a. Nyatakan masing-masing unsur minterm kedalam kode biner

   0 = 0000

   3 = 0011

   7 = 0111

   8 = 1000

   9 = 1001

   13 = 1011

b. Tentukan jumlah logik 1 dalam suatu angka biner sebagai indeks dari angka. Kumpulkan semua angka biner yang berindeks sama menjadi satu kelompok pada tabel 1

   0 = 0000 → jumlah logik 1 = 0

   3 = 0011→ jumlah logic 1 = 2

   7 = 0111→ jumlah logic 1 = 3

   8 = 1000 → jumlah logic 1 = 1

   9 = 1001→ jumlah logic 1 = 2

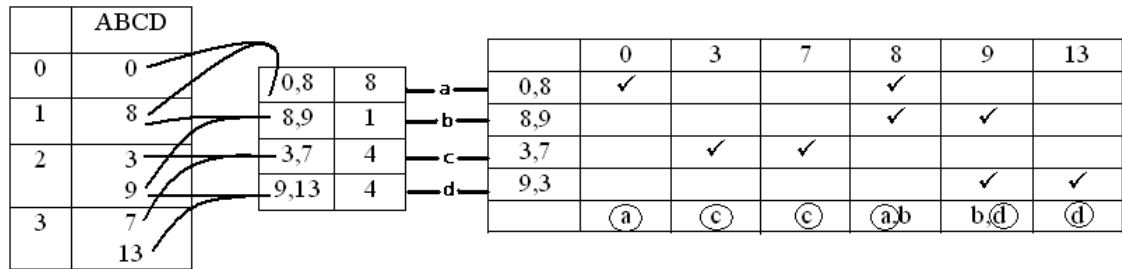
   13 = 1011→ jumlah logic 1 = 3

	ABCD
0	0
1	8
2	3 9
3	7 13

c. Bandingkan antara tiap unsur mulai dari indeks terkecil dengan tiap unsur dari indeks sesudahnya. Nilai unsur dari indeks pertama harus lebih kecil dari nilai unsur indeks sesudahnya. Apabila terdapat selisih 2^n maka boleh digabung. Langkah ini akan menghasilkan kelompok baru.
d. Lakukan kembali langkah c sampai tidak ada lagi selisih 2^n.
e. Tiap kelompok diberi nama.

	ABCD
0	0
1	8
2	3
	9
3	7
	13

0,8	8	a
8,9	1	b
3,7	4	c
9,13	4	d

	0	3	7	8	9	13
0,8	✓			✓		
8,9				✓	✓	
3,7		✓	✓			
9,3					✓	✓
	(a)	(c)	(c)	(a),b	b,(d)	(d)

f. Untuk penyelesaian, kita ambil satu nama yang mewakili tiap angka (a, b, c atau d). Pengambilan nama harus seminimal mungkin.
   Sehingga akan didapat

F = a + c + d

= 0000 + 0011 + 1001

= 1000 + 0111 + 1011

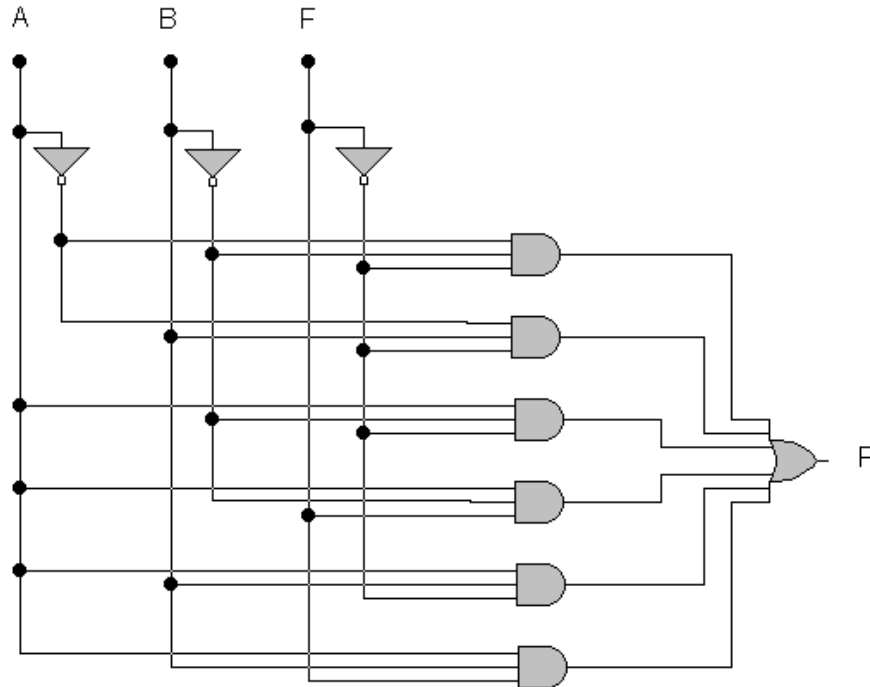
= -000 + 0-11 + 10-1

$$= \overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}CD + A\overline{B}D$$

Sebagai contoh sederhanakan persamaan logika pada table kebenaran dibawah ini.

A	B	C	F
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

$$F = \overline{A}\overline{B}\overline{C} + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\overline{C} + A\overline{B}C + AB\overline{C} + ABC$$

Maka rangkaian logikanya adalah

Persamaan diatas dapat disederhanakan dengan beberapa metode yang telah dijelaskan diatas.

- Dengan aljabar Boolean

$$
\begin{aligned}
F &= \overline{A}\overline{B}\overline{C} + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\overline{C} + A\overline{B}C + AB\overline{C} + ABC \\
&= \overline{A}\overline{C}(\overline{B} + B) + A(\overline{B}\overline{C} + \overline{B}C + B\overline{C} + BC) \\
&= \overline{A}\overline{C}(1) + A(1) \\
&= \overline{A}\overline{C} + A \\
&= A + \overline{C}
\end{aligned}
$$

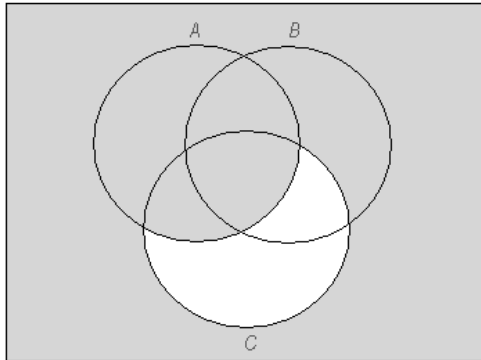
- Dengan K-map

A	B	C	F
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

	$\overline{B}\overline{C}$	$\overline{B}C$	BC	$B\overline{C}$
$\overline{A}$	1	0	0	1
A	1	1	1	1

$$F = A + \overline{C}$$

- Dengan diagram venn

$$F = \overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C} + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\,\overline{C} + A\overline{B}C + AB\overline{C} + ABC$$

Dari gambar disamping kita bisa lihat lingkaran *A* terisi oleh arsiran sedangkan lingkaran *C* tidak terisi oleh arsiran hanya sebagian yang terisi dan itupun sudah terwakili oleh lingkaran *A*. jadi $F = A + \overline{C}$

- Dengan Quine Mc-Cluskey

$$F = \overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C} + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\,\overline{C} + A\overline{B}C + AB\overline{C} + ABC$$

000 010 100 101 110 111 → Biner

0 2 4 5 6 7 → Desimal

Jumlah logik 1	ABCD
0	0
1	2
	4
2	5
	6
3	7

0,2	2
0,4	4
2,6	4
4,5	1
4,6	2
5,7	2
6,7	1

0,2,4,6	4
0,4,2,6	2
4,5,6,7	2
4,6,5,7	1

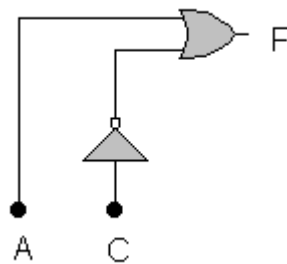
0,2,4,6	a
4,5,6,7	b

0	2	4	5	6	7
✓	✓	✓		✓	
		✓	✓	✓	✓
a	a	a b	b	a b	b

F = a + b → (0,2,4,6) + (4,5,6,7)

ABC	ABC
000	100
010	101
100	110
110	111
$0 = \overline{C}$	$1 \quad = A$

$$F = A + \overline{C}$$

Jadi penyederhanaan persaaan logika diatas dapat diimplementasikan dalam rangkaian sebagai berikut ;

$$F = A + \overline{C}$$

Teknik Implementasi

Implementasi merupakan suatu teknik untuk merealisasikan suatu persamaan logika ke dalam bentuk rangkaian logika. Teknik implementasi sangat penting peranannya dalam perencanaan Sistem-sistem diital.

Salah satu tujuan yang hendak dicapai dalam teknik implementasi ini adalah meralisasikan suatu persamaan logika dengan menggunakan jenis-jenis komponen yang banyak terdapat di pasaran serta dengan memperhatikan segi ekonomis dan kecepatan respon rangkaian.

Gerbang-gerbang Nand dan Nor mempunyai kelebihan dibandingkan dengan gerbang logika lainnya karena dengan menggunakan gerbang logika Nand dan Nor dapat diperoleh fungsi-fungsi And, Or, Ex-Or, Ex-Nor maupun Not gate.

Penulisan persamaan logika bias dilakukan dengan 2 metoda yaitu metoda SOP (Sum Of Product) yang mengacu pada logic 1 pada output dan metoda POS (Product Of Sum) yang mengacu pada logic 0 pada output.

1) Representasi Numerik dari persamaan SOP

Penulisan persamaan logika dalam bentuk SOP untuk persamaan yang memilki jumlah suku dan variable yang banyak biasanya relative panjang. Caranya adalah dengan melakukan representasi numerik.

Contoh:

$F = A'B'C + A'BC + AB'C + ABC$

Dapat disingkat menjadi:

$f(A,B,C)= \Sigma\ (1,3,5,7)$

Dimana angka decimal 1,3,5,7 merupakan nilai biner dari suku A'B'C, A'BC, AB'C, dan ABC. Dalam suatu persamaan Sop, setiap suku yang mempunyai jumlah variable lengkap (diwakili oleh seluruh variable yang digunakan disebut minterm (disingkat m)).

Untuk membedakan suatu minterm dari minterm yang lain, masing-masing minterm diberikan symbol tersendiri, yaitu dengan menggunakan huruf kecil m dengan subskrip sesuai dengan nilai desimalnya. Misalnya minterm A'B'C diberi symbol m_0; minterm A'BC diberi symbol m_1, dan lainnya.

2) Representasi Numerik dari persamaan POS

Penulisan persamaan logika output dalam bentuk product of sum juga dapat disederhanakan menggunakan cara representasi numeric. Caranya dengan mencari ekuivalen biner dari masing-masing sukunyakemudian merubah nilai biner dari masing-masing sukunya, kemudian merubah nilai biner tersebut ke dalam bilangan decimal.

Contoh:

$$F = (A+B+C).(A+B'+C).(A'+B+C).(A'+B'+C)$$

Disingkat menjadi:

$$f(A,B,C) = \pi(0,2,4,6)$$

Dimana angka decimal 0 menggantikan suku (A+B+C) yang mempunyai nilai biner 000; angka decimal 2 menggantikan suku (A+B'+C) yang mempunyai nilai biner 010; angka decimal 4 menggantikan suku (A'+B'+C) yang mempunyai biner 100; angka decimal 6 menggantikan suku (A'+B'+C) yang mempunyai biner 110.

Pada suatu persamaan POS, setiap suku yang mempunyai jumlah variable lengkap (terwakili oleh variable yang digunkan) disebut maxterm (disingkat M). Untuk membedakan suatu maxterm dari maxterm yang lain, masing-masing maxterm diberikan symbol tersendiri, yaitu dengan menggunakan huruf besar M dengan subskrip sesuai dengan nilai desimalnya. Misalnya maxterm (A+B+C) diberi symbol M_0; maxterm (A+B'+C) diberi symbol M_1, dll.

3) Merubah persamaan SOP ke POS dan sebaliknya

Representasi numeric juga dapat digunakan untuk memudahkan dalam merubah suatu persamaan logika dari bentuk Sum Of Product (SOP) menjadi Product Of Sum (POS).

Contoh:

$$f(A,B,C) = A'B'C + A'BC' + AB'C + ABC$$

Dalam representasi numeric, ditulis:

$f(A,B,C) = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$

Atau $f(A,B,C) = \sum (1,2,5,7)$

Dalam bentuk POS, dapat ditulis:

$f(A,B,C) = \pi\ (0,3,4,6)$

Atau $f(A,B,C) = M_0.M_3.M_4.M_6$

Atau $f(A,B,C) = (A+B+C).(A+B'+C').(A'+B+C).(A'+B'+C)$

Pada contoh diatas, persamaan SOP terdiri dari 3 variabel input yaitu A,B,C, dengan demikian akan terdapat 23 = 8 kombinasi input (dalam angka decimal : 0,1,2,3,4,5,6,7). Dengan kata lain terdapat sebanyak 8 minterm. Dalam persamaan SOP di atas hanya terdiri dari 4 buah minterm (m_1; m_2 ; m_5 dan m_7). Perhatikan bahwa nagka-angka subskrip yang digunakan adalah 1; 2; 5 dan 7, sisanya yaitu angka-angka 0;3;4 dan 6 akan menjadi subskrip untuk maxterm persamaan dalam bentuk POS.

Jadi,

$f(A,B,C) = \sum (1,2,5,7) = \pi(0,3,4,6)$

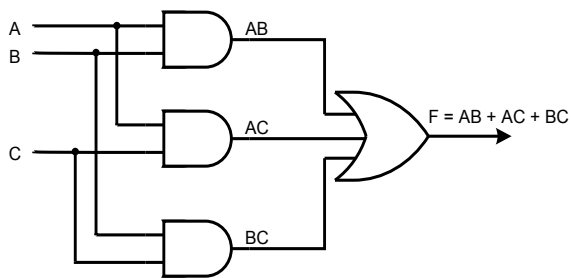
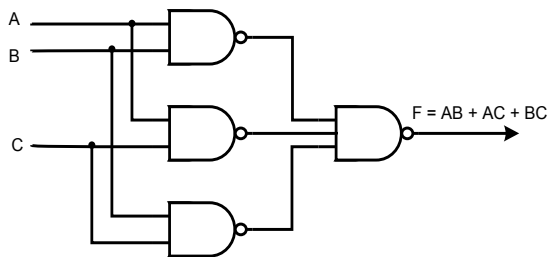
atau,

$f(A,B,C) = m_1 + m_2 + m_5 + m_7 = M_0.M_3.M_4.M_6$

4) Implementasi persamaan SOP dengan gerbang Nand

Suatu persamaan dalam bentuk SOP dapat diimplementasikan atau direalisasikan hanya dengan menggunakan gerbang-gerbang NAND. Misalnya, untuk persamaan SOP berikut:

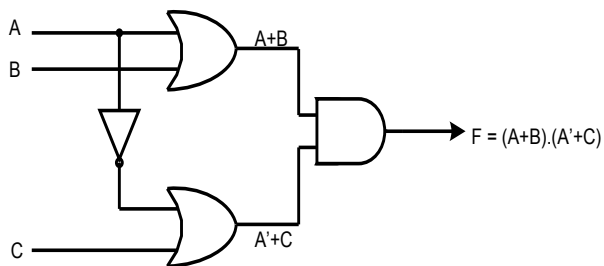
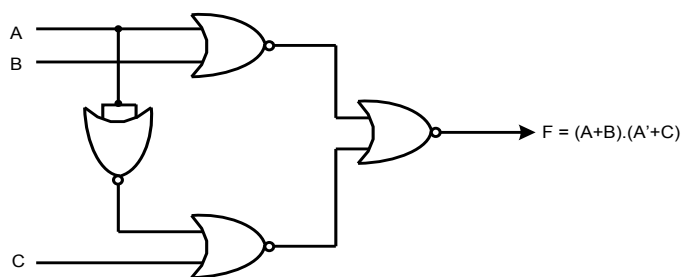
$F = AB + AC + BC$

Implementasi rangkaiannya adalah:

Rangkaian diatas dapat diganti hanya dengan menggunaan gerbang NAND sbb:

5) Implementasi persamaan POS dengan gerbang Nor

Setiap persamaan logika output yang berada dalam bentuk POS dapat langsung diimplementasikan dengan menggunakan gerbang-gerbang NOR.

Sebagai contoh, dibawah ini deberikan suatu persamaan logika dalam bentuk POS:

$F = (A+B).(A'+C)$

Persamaan diatas dapat diimplementasikan dengan menggunakan beberapa jenis gate sbb:

Akan tetapi, persamaan di atas dapat pula diimplementasikan hanya dengan menmggunakan gerbang-gerbang NOR sbb:

Rangkuman

1. Sistem kendali telah memegang peranan yang sangat penting dalam perkembangan ilmu dan teknologi. Peranan sistem kendali meliputi semua bidang kehidupan. Dalam peralatan, misalnya proses pada industri pesawat terbang, peluru kendali, pesawat ruang angkasa, dan lain-lain. Sedangkan dalam bidang non teknis meliputi bidang biologi, ekonomi, sosial, kedokteran, dan lain-lain. Sistem kendali yang semakin berkembang dapat meningkatkan kinerja sistem, kualitas produksi, dan menekan biaya produksi. Sistemkendali dapat dikatakan sebagai hubungan antara komponen yang membentuk sebuah
2. konfigurasi sistem, yang akan menghasilkan tanggapan sistem yang diharapkan. Jadi harusada yang dikendalikan, yang merupakan suatu sistem fisis, yang biasa disebut dengan kendalian. Masukan dan keluaran merupakan variabel atau besaran fisis. Keluaran merupakan hal yang dihasilkan oleh kendalian, artinya yang dikendalikan, sedangkan masukan adalah yang mempengaruhi kendalian, yang mengatur keluaran. Kedua dimensi masukan dan keluaran tidak harus sama.
3. Sistem bilangan (number Sistem) adalah suatu cara untuk mewakili besaran dari suatu item fisik. Sistem bilangan yang banyak dipergunakan oleh manusia adalah Sistem biilangan desimal, yaitu sisitem bilangan yang menggunakan 10 macam symbol untuk mewakili

suatu besaran., Sistem bilangan Desimal menggunakan 10 macam symbol yaitu 0,1,2,3,4,5,6,7,8,dan 9. Sistem ini menggunakan basis 10.

4. Sistem bilangan Binar menggunakan 2 macam symbol bilangan berbasis 2 digit angka, yaitu 0 dan 1.
5. Sistem bilangan Oktal menggunakan 8 macam symbol bilangan berbasis 8 digit angka, yaitu 0 ,1,2,3,4,5,6,7.
6. Sistem bilangan Hexadesimal menggunakan 16 macam symbol bilangan berbasis 8 digit angka, yaitu 0 ,1,2,3,4,5,6,7,8,9,A,B,C,D,Edan F Dimana A = 10, B = 11, C= 12, D = 13 , E = 14 dan F = 15
7. Konversi bilangan adalah suatu proses dimana satu Sistem bilangan dengan basis tertentu akan dijadikan bilangan dengan basis yang alian.
8. Besaran digital adalah besaran yang terdiri dari besaran level tegangan *High* dan *Low*, atau dinyatakan dengan logika "1" dan "0". Level *high* adalah identik dengan tegangan "5 Volt" atau logika "1", sedang level low identik dengan tegangan "0 Volt" atau logika "0".
9. Gerbang dasar AND adalah ekivalen dengan dua buah saklar terbuka yang terpasang seri.
10. Gerbang dasar OR adalah ekivalen dengan dua buah saklar terbuka yang terpasang parallel / jajar.
11. Gerbang dasar NAND adalah ekivalen dengan dua buah saklar terbuka yang terpasang seri.
12. Gerbang dasar NOR adalah ekivalen dengan dua buah saklar terbuka yang terpasang parallel / jajar.
13. Aljabar boolean merupakan aljabar yang berhubungan dengan variabel-variabel biner dan operasi-operasi logik.
14. DALIL BOOLEAN ;
    1. X=0 ATAU X=1
    2. 0 . 0 = 0
    3. 1 + 1 = 1
    4. 0 + 0 = 0
    5. 1 . 1 = 1
    6. 1 . 0 = 0 . 1 = 0

7. 1 + 0 = 0 + 1 = 0

TEOREMA BOOLEAN

1. HK. KOMUTATIF

   A + B = B + A

   A . B = B . A

2. HK. ASSOSIATIF

   (A+B)+C = A+(B+C)

   (A.B) . C = A . (B.C)

3. HK. DISTRIBUTIF

   A . (B+C) = A.B + A.C

   A + (B.C) = (A+B) . (A+C)

4. HK. NEGASI

   (A') = A'

   (A')' = A

5. HK. ABRSORPSI

   A+ A.B = A

   A.(A+B) = A

6. HK. IDENTITAS

   A + A = A

   A . A = A

7.

   0 + A = A ----- 1. A = A

   1 + A = 1 ----- 0 . A = 0

8.

   A' + A = 1

   A' . A =0

9.

   A + A' . B = A + B

   A . (A + B)= A . B

10. DE MORGAN'S

   (A+ B)' = A' . B'

   (A . B)' = A' + B'

Salah satu cara untuk memudahkan untuk melukiskan hubungan antara variable dalam aljabar boolean adalah dengan menggunakan diagram venn.

Evaluasi

A. Evaluasi Diri

PenilaianDiri					
Evaluasi diri ini diisi oleh siswa, dengan memberikan tanda ceklis pada pilihan penilaian diri sesuai kemampua siswa bersangkutan.					
No	**Aspek Evaluasi**	**Penilaian diri**			
		Sangat Baik (4)	**Baik (3)**	**Kurang (2)**	**Tidak Mampu (1)**
A	**Sikap**				
1	Disiplin				
2	Kerjasama dalam kelompok				
3	Kreatifitas				
4	Demokratis				
B	**Pengetahuan**				
1	Saya memahami sistem kontrol sesuai jenis serta karakteristiknya				
2	Saya memahami Perinsip Dasar digital sesuai jenis serta karakteristik pengerjaan komponen				

Review

Kerjakan soal berikut dengan benar !

1. Jelaskan apa yang dimaksud sistem control?
2. Jelaskan jenis sistem control mekanik elektrik, hidrolik dan peneumatik!
3. Sebutkan dan jelaskan empat macam sistem bilangan !
4. Konversikan bilangan berikut :
   a. 10101111(2) = ...(10)
   b. 11111110(2) = ...(8)
   c. 10101110101 = ...(16)
5. Konversi dari :
   a. ACD (16) = ...(8)
   b. 174 (8) = ...(2)
6. BC1

   2A X

   ---

7. 245 (8) : 24 (8) =........(8)

SENSOR DAN TRANSDUSER

Kata Kunci:

- **Sensor**
- **Transduser**

Deskripsi

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi dari masa ke masa berkembang cepat terutama dibidang otomasi industri. Perkembangan ini tampak jelas di industri pemabrikan, dimana sebelumnya banyak pekerjaan menggunakan tangan manusia, kemudian beralih menggunakan mesin, berikutnya dengan *electro-mechanic* (semi otomatis) dan sekarang sudah menggunakan robotic (*full automatic*) seperti penggunaan *Flexible Manufacturing Systems* (*FMS*) dan *Computerized Integrated Manufacture* (*CIM*) dan sebagainya.

Model apapun yang digunakan dalam sistem otomasi pemabrikan sangat tergantung kepada keandalan sistem kendali yang dipakai. Hasil penelitian menunjukan secanggih apapun sistem kendali yang dipakai akan sangat tergantung kepada sensor maupun transduser yang digunakan..

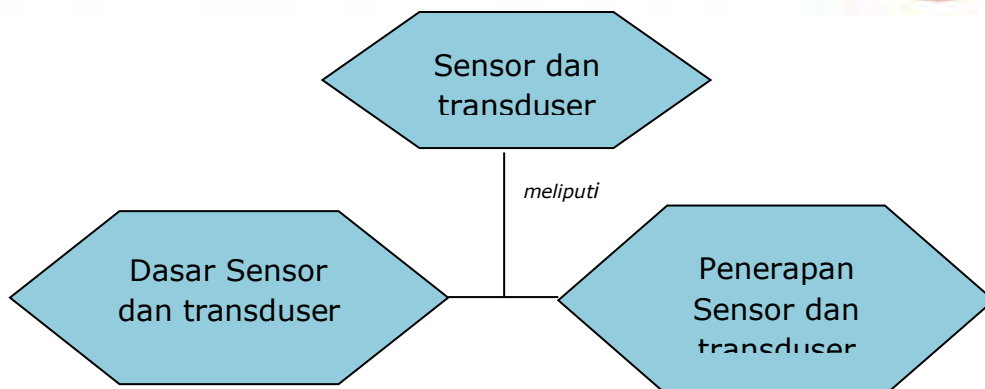
Sensor dan transduser merupakan peralatan atau komponen yang mempunyai peranan penting dalam sebuah sistem pengaturan otomatis. Ketepatan dan kesesuaian dalam memilih sebuah **sensor** akan sangat menentukan kinerja dari sistem pengaturan secara otomatis.

Besaran masukan pada kebanyakan sistem kendali adalah bukan besaran listrik, seperti besaran fisika, kimia, mekanis dan sebagainya. Untuk memakaikan besaran listrik pada sistem pengukuran, atau sistem manipulasi atau sistem pengontrolan, maka biasanya besaran yang bukan

listrik diubah terlebih dahulu menjadi suatu sinyal listrik melalui sebuah alat yang disebut *transducer*

Sebelum lebih jauh kita mempelajari sensor dan transduser ada sebuah alat lagi yang selalu melengkapi dan mengiringi keberadaan sensor dan transduser dalam sebuah sistem pengukuran, atau sistem manipulasi, maupun sistem pengontrolan yaitu yang disebut alat ukur

Setelah mempelajari Bab 2 ini, Kamu diharapkan dapat;

11. Mengidentifikasi lingkup materi Sensor dan transduser
12. Menerapkan prinsip Sensor dan transduser

Rencana Belajar Siswa

Pada hari ini, ... tanggal ....tahun .... Guru beserta siswa merencanakan pelaksanaan kegiatan belajar sebagaimana tabel di bawah ini

No	Jenis kegiatan	Tanggal	Waktu	Tempat belajar	Catatan Perubahan
1	Memahami Sensor dan transduser				
2	Memahami Penerapan Sensor dan transduser				
3	Mengerjakan soal evaluasi				

..........................., ...		
Guru	Orangtua/Wali Siswa	Siswa
....	....	....

Uraian Materi

A. Sensor Dan Transduser

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi dari masa ke masa berkembang cepat terutama dibidang otomasi industri. Perkembangan ini tampak jelas di industri pemabrikan, dimana sebelumnya banyak pekerjaan menggunakan tangan manusia, kemudian beralih menggunakan mesin, berikutnya dengan *electro-mechanic* (semi otomatis) dan sekarang sudah menggunakan robotic (*full automatic*) seperti penggunaan *Flexible Manufacturing Systems* (*FMS*) dan *Computerized Integrated Manufacture* (*CIM*) dan sebagainya.

Model apapun yang digunakan dalam sistem otomasi pemabrikan sangat tergantung kepada keandalan sistem kendali yang dipakai. Hasil penelitian menunjukan secanggih apapun sistem kendali yang dipakai akan sangat tergantung kepada sensor maupun transduser yang digunakan..

Sensor dan transduser merupakan peralatan atau komponen yang mempunyai peranan penting dalam sebuah sistem pengaturan otomatis. Ketepatan dan kesesuaian dalam memilih sebuah **sensor** akan sangat menentukan kinerja dari sistem pengaturan secara otomatis.

Besaran masukan pada kebanyakan sistem kendali adalah bukan besaran listrik, seperti besaran fisika, kimia, mekanis dan sebagainya. Untuk memakaikan besaran listrik pada sistem pengukuran, atau sistem manipulasi atau sistem pengontrolan, maka biasanya besaran yang bukan listrik diubah terlebih dahulu menjadi suatu sinyal listrik melalui sebuah alat yang disebut *transducer*

Sebelum lebih jauh kita mempelajari sensor dan transduser ada sebuah alat lagi yang selalu melengkapi dan mengiringi keberadaan sensor dan transduser dalam sebuah sistem pengukuran, atau sistem manipulasi, maupun sistem pengontrolan yaitu yang disebut alat ukur.

1. Definisi-definisi

a) Sensor adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk mendeteksi gejala-gejala atau sinyal-sinyal yang berasal dari perubahan suatu energi seperti energi listrik, energi fisika, energi kimia, energi biologi, energi mekanik dan sebagainya.

   Contoh; Camera sebagai sensor penglihatan, telinga sebagai sensor pendengaran, kulit sebagai sensor peraba, LDR (*light dependent resistance*) sebagai sensor cahaya, dan lainnya.

b) Transduser adalah sebuah alat yang bila digerakan oleh suatu energi di dalam sebuah sistem transmisi, akan menyalurkan energi tersebut dalam bentuk yang sama atau dalam bentuk yang berlainan ke sistem

transmisi berikutnya”. Transmisi energi ini bisa berupa listrik, mekanik, kimia, optic (radiasi) atau thermal (panas).

Contoh; generator adalah transduser yang merubah energi mekanik menjadi energi listrik, motor adalah transduser yang merubah energi listrik menjadi energi mekanik, dan sebagainya.

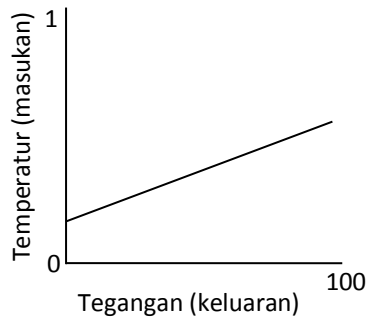
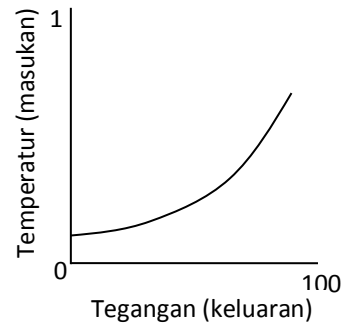
c) Alat ukur adalah sesuatu alat yang berfungsi memberikan batasan nilai atau harga tertentu dari gejala-gejala atau sinyal yang berasal dari perubahan suatu energi.

d) Contoh: voltmeter, ampermeter untuk sinyal listrik; tachometer, speedometer untuk kecepatan gerak mekanik, lux-meter untuk intensitas cahaya, dan sebagainya.

2. Persyaratan Umum Sensor dan Transduser

Dalam memilih peralatan sensor dan transduser yang tepat dan sesuai dengan sistem yang akan disensor maka perlu diperhatikan persyaratan umum sensor berikut ini : (D Sharon, dkk, 1982)

a. Linearitas

Ada banyak sensor yang menghasilkan sinyal keluaran yang berubah secara kontinyu sebagai tanggapan terhadap masukan yang berubah secara kontinyu. Sebagai contoh, sebuah sensor panas dapat menghasilkan tegangan sesuai dengan panas yang dirasakannya. Dalam kasus seperti ini, biasanya dapat diketahui secara tepat bagaimana perubahan keluaran dibandingkan dengan masukannya berupa sebuah grafik. Gambar 3.1 memperlihatkan hubungan dari dua buah sensor panas yang berbeda. Garis lurus pada gambar 3.1(a). memperlihatkan tanggapan linier, sedangkan pada gambar 3.1(b). adalah tanggapan non-linier.

(a) Tangapan linier

(b) Tangapan non linier

Gambar 3.1 Keluaran dari transduser panas

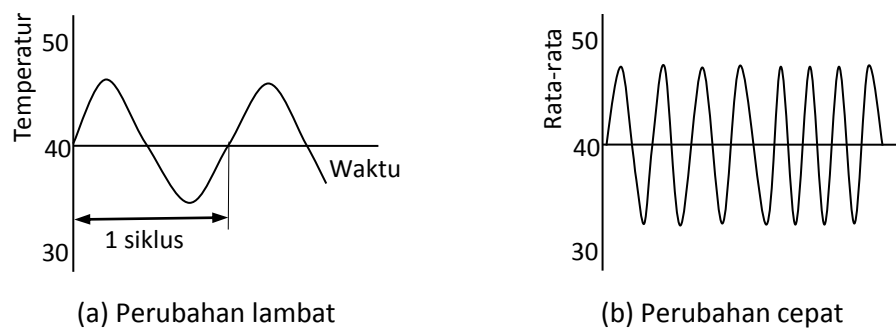
b. Sensitivitas

Sensitivitas akan menunjukan seberapa jauh kepekaan sensor terhadap kuantitas yang diukur. Sensitivitas sering juga dinyatakan dengan bilangan yang menunjukan "perubahan keluaran dibandingkan unit perubahan masukan". Beberepa sensor panas dapat memiliki kepekaan yang dinyatakan dengan "satu volt per derajat", yang berarti *perubahan* satu derajat pada masukan akan menghasilkan *perubahan* satu volt pada keluarannya. Sensor panas lainnya dapat saja memiliki kepekaan "dua volt per derajat", yang berarti memiliki kepakaan dua kali dari sensor yang pertama. Linieritas sensor juga mempengaruhi sensitivitas dari sensor. Apabila tanggapannya linier, maka sensitivitasnya juga akan sama untuk jangkauan pengukuran keseluruhan. Sensor dengan tanggapan pada gambar 3.1(b) akan lebih peka pada temperatur yang tinggi dari pada temperatur yang rendah.

c. Tanggapan Waktu

Tanggapan waktu pada sensor menunjukan seberapa cepat tanggapannya terhadap perubahan masukan. Sebagai contoh, instrumen dengan tanggapan frekuensi yang jelek adalah sebuah termometer merkuri. Masukannya adalah temperatur dan keluarannya adalah posisi merkuri. Misalkan perubahan temperatur

terjadi sedikit demi sedikit dan kontinyu terhadap waktu, seperti tampak pada gambar 3.2(a).

Frekuensi adalah jumlah siklus dalam satu detik dan diberikan dalam satuan hertz (Hz). { 1 hertz berarti 1 siklus per detik, 1 kilohertz berarti 1000 siklus per detik]. Pada frekuensi rendah, yaitu pada saat temperatur berubah secara lambat, termometer akan mengikuti perubahan tersebut dengan "setia". Tetapi apabila perubahan temperatur sangat cepat lihat gambar 3.2(b) maka tidak diharapkan akan melihat perubahan besar pada termometer merkuri, karena ia bersifat lamban dan hanya akan menunjukan temperatur rata-rata.

Gambar 3.2 Temperatur berubah secara kontinyu

Ada bermacam cara untuk menyatakan tanggapan frekuensi sebuah sensor. Misalnya "satu milivolt pada 500 hertz". Tanggapan frekuensi dapat pula dinyatakan dengan "*decibel* (db)", yaitu untuk membandingkan daya keluaran pada frekuensi tertentu dengan daya keluaran pada frekuensi referensi.

Ketentuan lain yang perlu diperhatikan dalam memilih sensor yang tepat adalah dengan mengajukan beberapa pertanyaan berikut ini:

a. Apakah ukuran fisik sensor cukup memenuhi untuk dipasang pada tempat yang diperlukan?

b. Apakah ia cukup akurat?

c. Apakah ia bekerja pada jangkauan yang sesuai?

d. Apakah ia akan mempengaruhi kuantitas yang sedang diukur?.

Sebagai contoh, bila sebuah sensor panas yang besar dicelupkan kedalam jumlah air air yang kecil, malah menimbulkan efek memanaskan air tersebut, bukan menyensornya.

e. Apakah ia tidak mudah rusak dalam pemakaiannya?.

f. Apakah ia dapat menyesuaikan diri dengan lingkungannya?

g. Apakah biayanya terlalu mahal?

3. Jenis Sensor dan Transduser

Perkembangan sensor dan transduser sangat cepat sesuai kemajuan teknologi otomasi, semakin komplek suatu sistem otomasi dibangun maka semakin banyak jenis sensor yang digunakan.

Robotik adalah sebagai contoh penerapan sistem otomasi yang kompleks, disini sensor yang digunakan dapat dikatagorikan menjadi dua jenis sensor yaitu:

a. *Internal sensor*, yaitu sensor yang dipasang di dalam bodi robot. Sensor internal diperlukan untuk mengamati posisi, kecepatan, dan akselerasi berbagai sambungan mekanik pada robot, dan merupakan bagian dari mekanisme servo.

b. *External sensor*, yaitu sensor yang dipasang diluar bodi robot. Sensor eksternal diperlukan karena dua macam alasan yaitu:

1) Untuk keamanan dan

2) Untuk penuntun.

Yang dimaksud untuk keamanan" adalah termasuk keamanan robot, yaitu perlindungan terhadap robot dari kerusakan yang ditimbulkannya sendiri, serta keamanan untuk peralatan, komponen,

dan orang-orang dilingkungan dimana robot tersebut digunakan. Berikut ini adalah dua contoh sederhana untuk mengilustrasikan kasus diatas.

Contoh pertama: andaikan sebuah robot bergerak keposisinya yang baru dan ia menemui suatu halangan, yang dapat berupa mesin lain misalnya. Apabila robot tidak memiliki sensor yang mampu mendeteksi halangan tersebut, baik sebelum atau setelah terjadi kontak, maka akibatnya akan terjadi kerusakan.

Contoh kedua: sensor untuk keamanan diilustrasikan dengan problem robot dalam mengambil sebuah telur. Apabila pada robot dipasang pencengkram mekanik (*gripper*), maka sensor harus dapat mengukur seberapa besar tenaga yang tepat untuk mengambil telor tersebut. Tenaga yang terlalu besar akan menyebabkan pecahnya telur, sedangkan apabila terlalu kecil telur akan jatuh terlepas.

Kini bagaimana dengan sensor untuk penuntun atau pemandu?. Katogori ini sangatlah luas, tetapi contoh berikut akan memberikan pertimbangan.

Contoh pertama: komponen yang terletak diatas ban berjalan tiba di depan robot yang diprogram untuk menyemprotnya. Apa yang akan terjadi bila sebuah komponen hilang atau dalam posisi yang salah?. Robot tentunya harus memiliki sensor yang dapat mendeteksi ada tidaknya komponen, karena bila tidak ia akan menyemprot tempat yang kosong. Meskipun tidak terjadi kerusakan, tetapi hal ini bukanlah sesuatu yang diharapkan terjadi pada suatu pabrik.

Contoh kedua: sensor untuk penuntun diharapkan cukup canggih dalam pengelasan. Untuk melakukan operasi dengan baik, robot haruslah menggerakkan tangkai las sepanjang garis las yang telah ditentukan, dan juga bergerak dengan kecepatan yang tetap serta mempertahankan suatu jarak tertentu dengan permukaannya.

Sesuai dengan fungsi sensor sebagai pendeteksi sinyal dan meng-informasikan sinyal tersebut ke sistem berikutnya, maka peranan dan

fungsi sensor akan dilanjutkan oleh transduser. Karena keterkaitan antara sensor dan transduser begitu erat maka pemilihan transduser yang tepat dan sesuai juga perlu diperhatikan.

4. Klasifikasi Sensor

Secara umum berdasarkan fungsi dan penggunaannya sensor dapat dikelompokan menjadi 3 bagian yaitu:

a. sensor thermal (panas)

b. sensor mekanis

c. sensor optik (cahaya)

Sensor thermal adalah sensor yang digunakan untuk mendeteksi gejala perubahan panas/temperature/suhu pada suatu dimensi benda atau dimensi ruang tertentu.

Contohnya; *bimetal, termistor, termokopel, RTD, photo transistor, photo dioda, photo multiplier, photovoltaik, infrared pyrometer, hygrometer,* dsb.

Sensor mekanis adalah sensor yang mendeteksi perubahan gerak mekanis, seperti perpindahan atau pergeseran atau posisi, gerak lurus dan melingkar, tekanan, aliran, level dsb.

Contoh; *strain gage*, *linear variable deferential transformer* (*LVDT*), *proximity*, *potensiometer, load cell, bourdon tube,* dsb.

Sensor optic atau cahaya adalah sensor yang mendeteksi perubahan cahaya dari sumber cahaya, pantulan cahaya ataupun bias cahaya yang mengernai benda atau ruangan.

Contoh; *photo cell, photo transistor, photo diode, photo voltaic, photo multiplier, pyrometer optic,* dsb.

5. Klasifikasi Transduser

a. *Self generating transduser* (transduser pembangkit sendiri)

Self generating transduser adalah transduser yang hanya memerlukan satu sumber energi.

Contoh: *piezo electric, termocouple, photovoltatic, termistor*, dsb.

Ciri transduser ini adalah dihasilkannya suatu energi listrik dari transduser secara langsung. Dalam hal ini transduser berperan sebagai sumber tegangan.

b. *External power transduser* (transduser daya dari luar)

External power transduser adalah transduser yang memerlukan sejumlah energi dari luar untuk menghasilkan suatu keluaran.

Contoh: RTD (*resistance thermal detector*), Strain gauge, LVDT (*linier variable differential transformer*), Potensiometer, NTC, dsb.

Tabel berikut menyajikan prinsip kerja serta pemakaian transduser berdasarkan sifat kelistrikannya.

Tabel 1.
Kelompok Transduser

Parameter listrik dan kelas transduser	Prinsip kerja dan sifat alat	Pemakaian alat
Transduser Pasif		
Potensiometer	Perubahan nilai tahanan karena posisi kontak bergeser	Tekanan, pergeseran/posisi
Strain gage	Perubahan nilai tahanan akibat perubahan panjang kawat oleh tekanan dari	Gaya, torsi, posisi

Parameter listrik dan kelas transduser	Prinsip kerja dan sifat alat	Pemakaian alat
	luar	
Transformator selisih (LVDT)	Tegangan selisih dua kumparan primer akibat pergeseran inti trafo	Tekanan, gaya, pergeseran
Gage arus pusar	Perubahan induktansi kumparan akibat perubahan jarak plat	Pergeseran, ketebalan
Transduser Aktif		
Sel fotoemisif	Emisi elektron akibat radiasi yang masuk pada permukaan fotemisif	Cahaya dan radiasi
Photomultiplier	Emisi elektron sekunder akibat radiasi yang masuk ke katoda sensitif cahaya	Cahaya, radiasi dan relay sensitif cahaya
Termokopel	Pembangkitan ggl pada titik sambung dua logam yang berbeda akibat dipanasi	Temperatur, aliran panas, radiasi
Generator kumparan putar (tachogenerator)	Perputaran sebuah kumparan di dalam medan magnit yang membangkitkan tegangan	Kecepatan, getaran
Piezoelektrik	Pembangkitan ggl bahan kristal piezo akibat gaya dari luar	Suara, getaran, percepatan, tekanan
Sel foto tegangan	Terbangkitnya tegangan pada sel foto akibat rangsangan energi dari luar	Cahaya matahari
Termometer tahanan (RTD)	Perubahan nilai tahanan kawat akibat perubahan temperature	Temperatur, panas

Parameter listrik dan kelas transduser	Prinsip kerja dan sifat alat	Pemakaian alat
Hygrometer tahanan	Tahanan sebuah strip konduktif berubah terhadap kandungan uap air	Kelembaban relatif
Termistor (NTC)	Penurunan nilai tahanan logam akibat kenaikan temperatur	Temperatur
Mikropon kapasitor	Tekanan suara mengubah nilai kapasitansi dua buah plat	Suara, musik,derau
Pengukuran reluktansi	Reluktansi rangkaian magnetik diubah dengan mengubah posisi inti besi sebuah kumparan	Tekanan, pergeseran, getaran, posisi

Contoh Soal :

1. Apa saja peranan dan fungsi sensor dalam sistem kendali industri ?
2. Sebutkan syarat-syarat dalam memilih sensor yang baik ?
3. Sebutkan beberapa jenis sensor yang ada pada sebuah robotik ?

Jawaban :

1. Sensor berperan untuk mendeteksi gejala perubahan informasi sinyal dalam sistem kontrol, dan berfungsi sebagai umpan balik pada sebuah sistem kendali otomatis.
2. Syarat sebuah sensor adalah linearitas, sensitivitas dan respon time
3. Jenis sensor pada robotik adalah: internal sensor dan eksternal sensor

B. Jenis Sensor

1. Sensor Thermal

AC. Srivastava, (1987), mengatakan temperatur merupakan salah satu dari empat besaran dasar yang diakui oleh Sistem Pengukuran Internasional (*The International Measuring System*). Lord Kelvin pada tahun 1848 mengusulkan skala temperature termodinamika pada suatu titik tetap *triple point,* dimana fase padat, cair dan uap berada bersama dalam equilibrium, angka ini adalah 273,16 ^{o}K (derajat Kelvin) yang juga merupakan titik es. Skala lain adalah Celcius, Fahrenheit dan Rankine dengan hubungan sebagai berikut:

$^{o}F = 9/5\ ^{o}C + 32$ atau

$^{o}C = 5/9\ (^{o}F - 32)$ atau

$^{o}R = {}^{o}F + 459{,}69$

Yayan I.B, (1998), mengatakan temperatur adalah kondisi penting dari suatu substrat. Sedangkan "panas adalah salah satu bentuk energi yang diasosiasikan dengan aktifitas molekul-molekul dari suatu substrat". Partikel dari suatu substrat diasumsikan selalu bergerak. Pergerakan partikel inilah yang kemudian dirasakan sebagai panas. Sedangkan temperatur adalah ukuran perbandingan dari panas tersebut.

Pergerakan partikel substrat dapat terjadi pada tiga dimensi benda yaitu:

1. Benda padat,

2. Benda cair dan

3. Benda gas (udara)

Aliran kalor substrat pada dimensi padat, cair dan gas dapat terjadi secara :

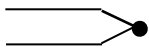
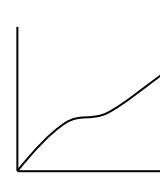
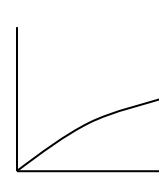
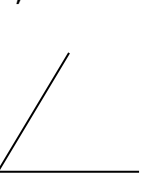
1. Konduksi, yaitu pengaliran panas melalui benda padat (penghantar) secara kontak langsung
2. Konveksi, yaitu pengaliran panas melalui media cair secara kontak langsung
3. Radiasi, yaitu pengaliran panas melalui media udara/gas secara kontak tidak langsung

Pada aplikasi pendeteksian atau pengukuran tertentu, dapat dipilih salah satu tipe sensor dengan pertimbangan :

1. Penampilan (*Performance*)
2. Kehandalan (*Reliable*) dan
3. Faktor ekonomis (*Economic*)

1) Pemilihan Jenis Sensor Suhu

Hal-hal yang perlu diperhatikan sehubungan dengan pemilihan jenis sensor suhu adalah: (Yayan I.B, 1998)

1. Level suhu maksimum dan minimum dari suatu substrat yang diukur.
2. Jangkauan (*range*) maksimum pengukuran
3. Konduktivitas kalor dari substrat
4. Respon waktu perubahan suhu dari substrat
5. Linieritas sensor
6. Jangkauan temperatur kerja

Selain dari ketentuan diatas, perlu juga diperhatikan aspek phisik dan kimia dari sensor seperti ketahanan terhadap korosi (karat), ketahanan terhadap guncangan, pengkabelan (instalasi), keamanan dan lain-lain.

2) Tempertur Kerja Sensor

Setiap sensor suhu memiliki temperatur kerja yang berbeda, untuk pengukuran suhu disekitar kamar yaitu antara -35°C sampai 150°C, dapat

dipilih sensor NTC, PTC, transistor, dioda dan IC hibrid. Untuk suhu menengah yaitu antara 150^{o}C sampai 700^{o}C, dapat dipilih thermocouple dan RTD. Untuk suhu yang lebih tinggi sampai 1500^{o}C, tidak memungkinkan lagi dipergunakan sensor-sensor kontak langsung, maka teknis pengukurannya dilakukan menggunakan cara radiasi. Untuk pengukuran suhu pada daerah sangat dingin dibawah 65^{o}K = -208^{o}C (0^{o}C = 273,16^{o}K) dapat digunakan resistor karbon biasa karena pada suhu ini karbon berlaku seperti semikonduktor. Untuk suhu antara 65^{o}K sampai -35^{o}C dapat digunakan kristal silikon dengan kemurnian tinggi sebagai sensor.

Gambar 3.3 berikut memperlihatkan karakteristik dari beberapa jenis sensor suhu yang ada.

	Thermocouple	RTD	Thermistor	IC Sensor

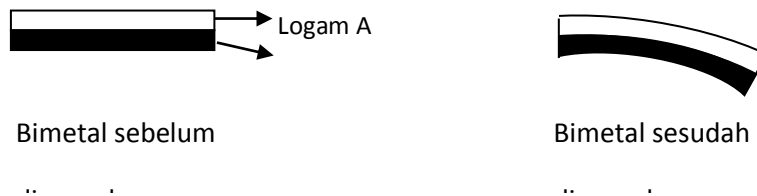
	V T	R T	R T	V, I T
Advantages	- self powered - simple - rugged - inexpensive - wide variety - wide temperature range	- most stable - most accurate - more linear than termocouple	- high output - fast - two-wire ohms measurement	- most linear - highest output - inexpensive
Disadvantages	- non linear - low voltage reference required - least stable - leastsensitive	- expensive - power supply required - small ΔR - low absolute resistance - self heating	- non linear - limited temperature range - fragile - power supply required - self heating	- $T < 200^oC$ - power supply required - slow - self heating - limited configuration

Gambar 3.3 Karakteristik sensor temperature

1) Bimetal

Bimetal adalah sensor temperatur yang sangat populer digunakan karena kesederhanaan yang dimilikinya. Bimetal biasa dijumpai pada alat strika listrik dan lampu kelap-kelip (dimmer). Bimetal adalah sensor suhu

yang terbuat dari dua buah lempengan logam yang berbeda koefisien muainya (α) yang direkatkan menjadi satu.

Bila suatu logam dipanaskan maka akan terjadi pemuaian, besarnya pemuaian tergantung dari jenis logam dan tingginya temperatur kerja logam tersebut. Bila dua lempeng logam saling direkatkan dan dipanaskan, maka logam yang memiliki koefisien muai lebih tinggi akan memuai lebih panjang sedangkan yang memiliki koefisien muai lebih rendah memuai lebih pendek. Oleh karena perbedaan reaksi muai tersebut maka bimetal akan melengkung kearah logam yang muainya lebih rendah. Dalam aplikasinya bimetal dapat dibentuk menjadi saklar *Normally Closed* (NC) atau *Normally Open* (NO).

Gambar 3.4 Kontruksi Bimetal

Disini berlaku rumus pengukuran temperature dwi-logam yaitu :

$$\rho = \frac{t[3(1+m)^2 + (1+mm)(m^2 + 1/mn)]}{6(\alpha_A + \alpha_B)(T_2 - T_1)(1+m)^2} \quad (3.1)$$

$$\rho = \frac{2t}{3(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)} \quad (3.2)$$

dan dalam praktek t_B/t_A = 1 dan (n+1).n =2, sehingga;

di mana ρ = radius kelengkungan

t = tebal jalur total

n = perbandingan modulus elastis, E_B/E_A

m = perbandingan tebal, t_B/t_A

T_2-T_1 = kenaikan temperature

α_A, α_B = koefisien muai panas logamA dan logam B

2) Termistor

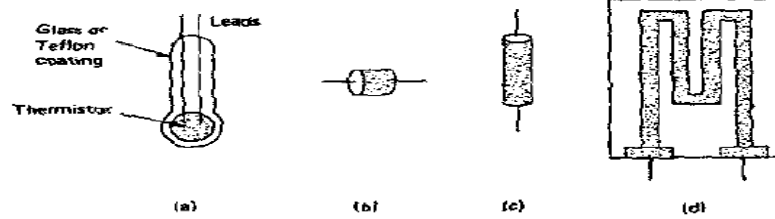
Termistor atau *tahanan thermal* adalah alat semikonduktor yang berkelakuan sebagai tahanan dengan koefisien tahanan temperatur yang tinggi, yang biasanya negatif. Umumnya tahanan termistor pada temperatur ruang dapat berkurang 6% untuk setiap kenaikan temperatur sebesar 1°C. Kepekaan yang tinggi terhadap perubahan temperatur ini membuat termistor sangat sesuai untuk pengukuran, pengontrolan dan kompensasi temperatur secara presisi.

Termistor terbuat dari campuran oksida-oksida logam yang diendapkan seperti: mangan (Mn), nikel (Ni), cobalt (Co), tembaga (Cu), besi (Fe) dan uranium (U). Rangkuman tahanannya adalah dari 0,5 Ω sampai 75 Ω dan tersedia dalam berbagai bentuk dan ukuran. Ukuran paling kecil berbentuk mani-manik (*beads*) dengan diameter 0,15 mm sampai 1,25 mm, bentuk piringan (*disk*) atau cincin (*washer*) dengan ukuran 2,5 mm sampai 25 mm. Cincin-cincin dapat ditumpukan dan di tempatkan secara seri atau paralel guna memperbesar disipasi daya.

Dalam operasinya termistor memanfaatkan perubahan resistivitas terhadap temperatur, dan umumnya nilai tahanannya turun terhadap temperatur secara eksponensial untuk jenis NTC (*Negative Thermal Coeffisien*)

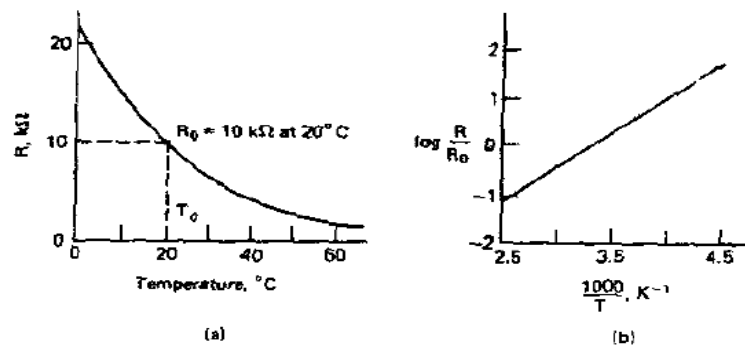
$$R_T = R_A e^{\beta T} \qquad (3.3)$$

Koefisien temperatur α didefinisikan pada temperature tertentu, misalnya 25°C sbb.:

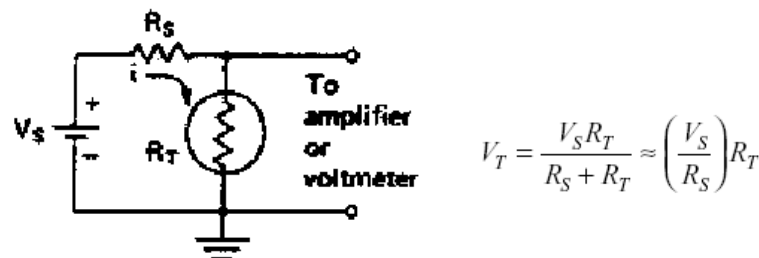
$$\alpha = \frac{\Delta R_T / R_T}{\Delta T} \qquad (3.4)$$

Gambar 3.5 Konfigurasi Thermistor: (a) coated-bead

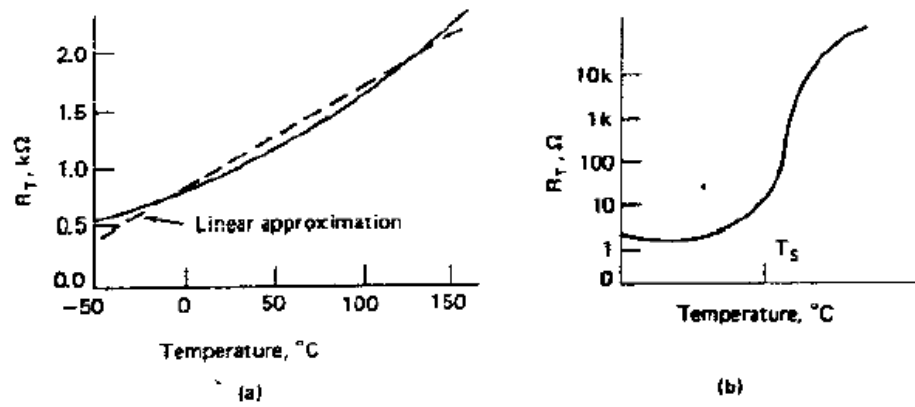
(b) disk (c) dioda case dan (d) thin-film

Teknik Kompensasi Termistor:

Karkateristik termistor berikut memperlihatkan hubungan antara temperatur dan resistansi seperti tampak pada gambar 3.6

Gambar 3.6 Grafik Termistor resistansi vs temperatuer:
(a) logaritmik (b) skala linier

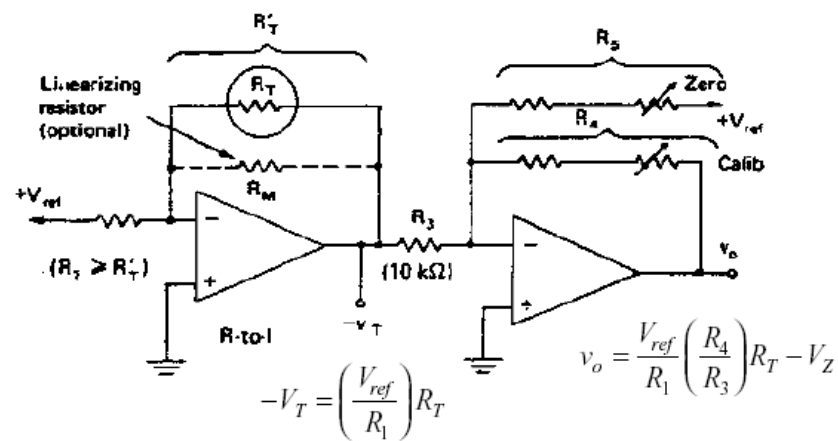
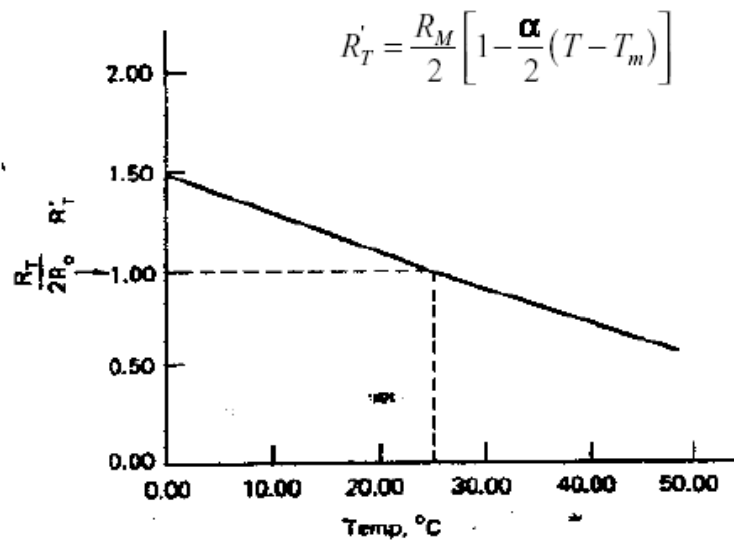
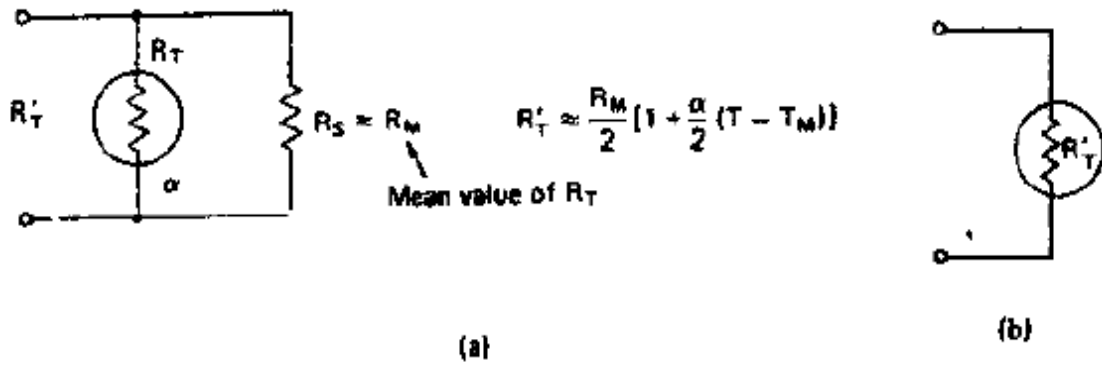
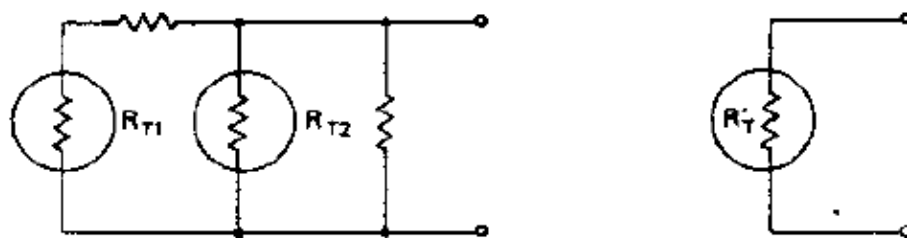
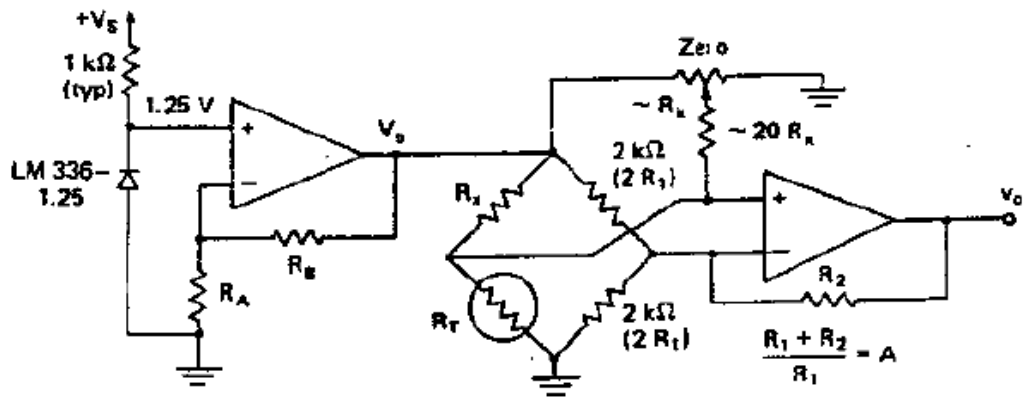
Untuk pengontrolan perlu mengubah tahanan menjadi tegangan, berikut rangkaian dasar untuk mengubah resistansi menjadi tegangan.

$$V_T = \frac{V_S R_T}{R_S + R_T} \approx \left(\frac{V_S}{R_S}\right) R_T$$

Gambar 3.7 Rangkaian uji termistor sebagai pembagi tegangan

Thermistor dengan koefisien positif (PTC, tidak baku)

Gambar 3.8 Termistor jenis PTC: (a) linier (b) switching

Cara lain untuk mengubah resistansi menjadi tegangan adalah dengan teknik linearisasi.

$$-V_T = \left(\frac{V_{ref}}{R_1}\right) R_T$$

$$v_o = \frac{V_{ref}}{R_1}\left(\frac{R_4}{R_3}\right) R_T - V_Z$$

Daerah resistansi mendekati linier

Untuk teknik kompensasi temperatur menggunakan rangkaian penguat jembatan lebih baik digunakan untuk jenis sensor resistansi karena rangkaian jembatan dapat diatur titik kesetimbangannya.

Gambar 3.9 Dua buah Termistor Linier:
(a) Rangkaian sebenarnya (b) Rangkaian Ekivalen

Gambar 3.10 Rangkaian penguat jembatan untuk resistansi sensor

Nilai tegangan outputnya adalah:

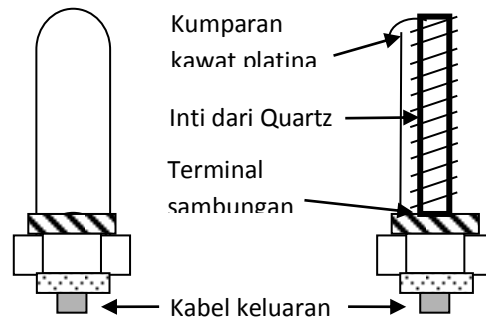
$$v_o \approx \frac{R_a + 2R_b}{R_a} \frac{V_b}{4} \frac{\Delta R}{R_x}$$

atau rumus lain untuk tegangan output

$$V_O = S_T \Delta T \qquad S_T = A\frac{V_b}{4}$$

$$A = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \qquad v_O = A\frac{V_b}{4}\left[\delta - \frac{\delta^2}{2} + \frac{\delta^3}{4}\right]$$

3) Resistance Thermal Detector (RTD)

RTD adalah salah satu dari beberapa jenis sensor suhu yang sering digunakan. RTD dibuat dari bahan kawat tahan korosi, kawat tersebut dililitkan pada bahan keramik isolator. Bahan tersebut antara lain; platina, emas, perak, nikel dan tembaga, dan yang terbaik adalah bahan platina karena dapat digunakan menyensor suhu sampai 1500^o C. Tembaga dapat digunakan untuk sensor suhu yang lebih rendah dan lebih murah, tetapi tembaga mudah terserang korosi.

Gambar 3.11 Konstruksi

RTD memiliki keunggulan dibanding termokopel yaitu:

1. Tidak diperlukan suhu referensi
2. Sensitivitasnya cukup tinggi, yaitu dapat dilakukan dengan cara memperpanjang kawat yang digunakan dan memperbesar tegangan eksitasi.
3. Tegangan output yang dihasilkan 500 kali lebih besar dari termokopel
4. Dapat digunakan kawat penghantar yang lebih panjang karena noise tidak jadi masalah
5. Tegangan keluaran yang tinggi, maka bagian elektronik pengolah sinyal menjadi sederhana dan murah.

Resistance Thermal Detector (RTD) perubahan tahanannya lebih linear terhadap temperatur uji tetapi koefisien lebih rendah dari thermistor dan model matematis linier adalah:

$$R_T = R_0(1 + \alpha \Delta t)$$

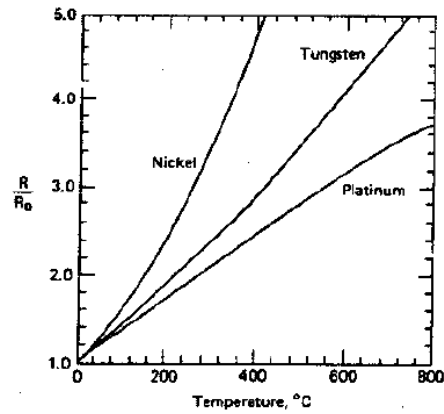
dimana : R_o = tahanan konduktor pada temperature awal (biasanya 0^oC)

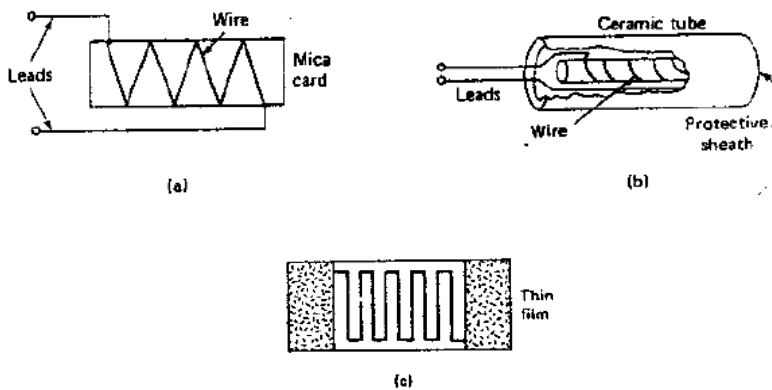
R_T = tahanan konduktor pada temperatur t^oC

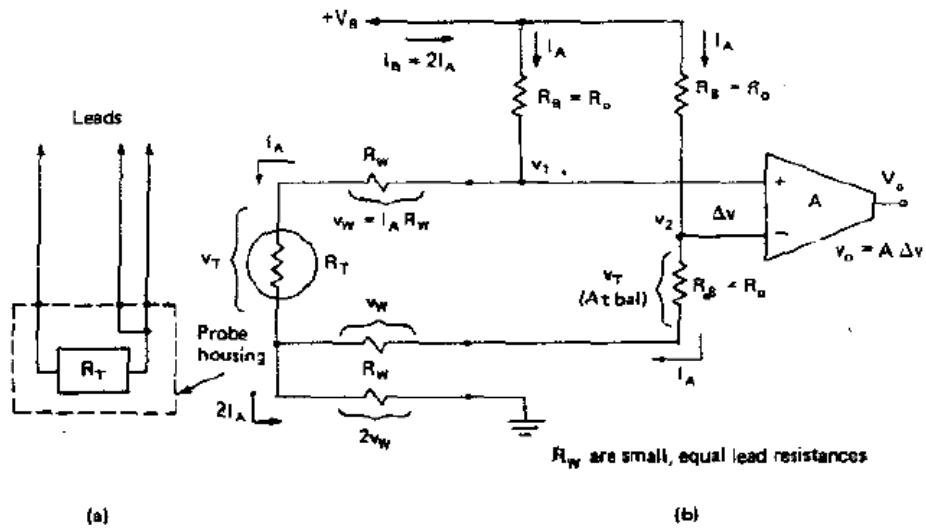
α = koefisien temperatur tahanan

Δt = selisih antara temperatur kerja dengan temperatur awal

Sedangkan model matematis nonliner kuadratik adalah:

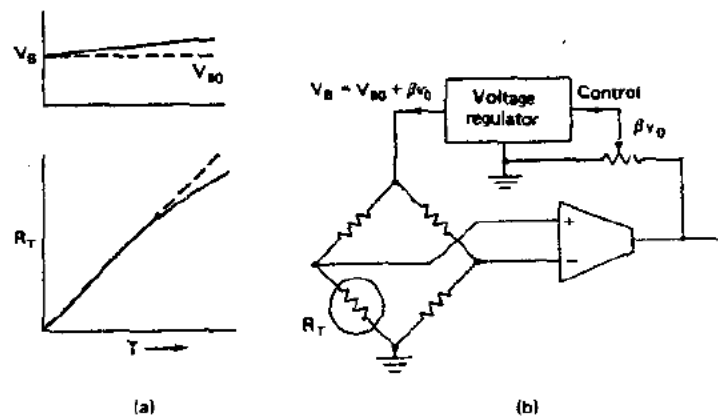
$$R_T = R_O\left(1 + AT - BT^2\right)$$

Gambar 3.12 Resistansi versus Temperatur untuk variasi RTD metal

Bentuk lain dari Konstruksi RTD

Gambar 3.13 Jenis RTD: (a) Wire (b) Ceramic Tube (c) Thin Film

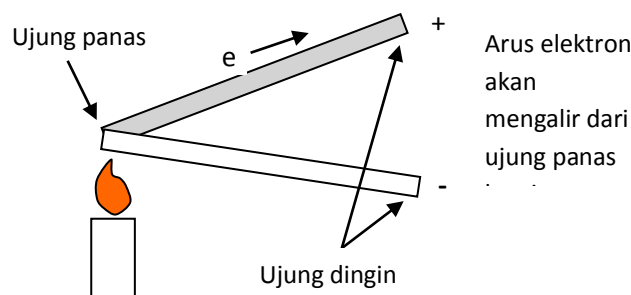
Rangkaian Penguat untuk three-wire RTD

Gambar 3.14 (a) Three Wire RTD (b) Rangkaian Penguat

Ekspansi Daerah Linier

Ekspansi daerah linear dapat dilakukan dengan dua cara yaitu:

1. Menggunakan tegangan referensi untuk kompensasi nonlinieritas
2. Melakukan kompensasi dengan umpan balik positif

Gambar 3.15 Kompensasi non linier (a) Respon RTD non linier; (b) Blok diagram rangkaian koreksi

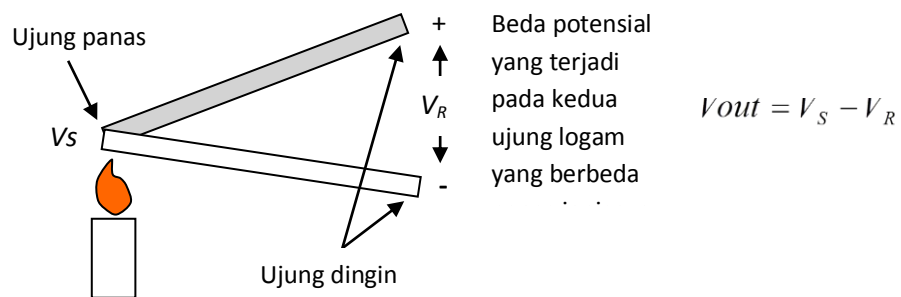
4) Termokopel

Pembuatan termokopel didasarkan atas sifat thermal bahan logam. Jika sebuah batang logam dipanaskan pada salah satu ujungnya maka pada ujung tersebut elektron-elektron dalam logam akan bergerak semakin aktif dan akan menempati ruang yang semakin luas, elektron-elektron saling desak dan bergerak ke arah ujung batang yang tidak dipanaskan. Dengan demikian pada ujung batang yang dipanaskan akan terjadi muatan positif.

Gambar 3.16 Arah gerak electron jika logam

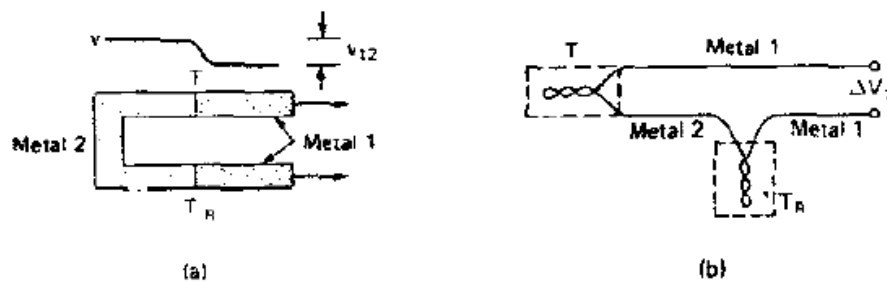
Kerapatan electron untuk setiap bahan logam berbeda tergantung dari jenis logam. Jika dua batang logam disatukan salah satu ujungnya, dan kemudian dipanaskan, maka elektron dari batang logam yang memiliki kepadatan tinggi akan bergerak ke batang yang kepadatan elektronnya rendah, dengan demikian terjadilah perbedaan tegangan diantara ujung kedua batang logam yang tidak disatukan atau dipanaskan. Besarnya termolistrik atau *gem (gaya electromagnet*) yang dihasilkan menurut T.J Seeback (1821) yang menemukan hubungan perbedaan panas (T_1 dan T_2) dengan gaya gerak listrik yang dihasilkan *E,* Peltir (1834), menemukan gejala panas yang mengalir dan panas yang diserap pada titik *hot-juction* dan *cold-junction,* dan Sir William Thomson, menemukan arah arus mengalir dari titik panas ke titik dingin dan sebaliknya, sehingga ketiganya menghasilkan rumus sbb:

$$E = \underbrace{C_1(T_1 - T_2)}_{\textit{Efek Peltier}} + \underbrace{C_2(T_1^2 - T_2^2)}_{\textit{Efek Thomson}}$$

atau $E = 37{,}5(T_1 - T_2) - 0{,}045(T_1^2 - T_2^2)$

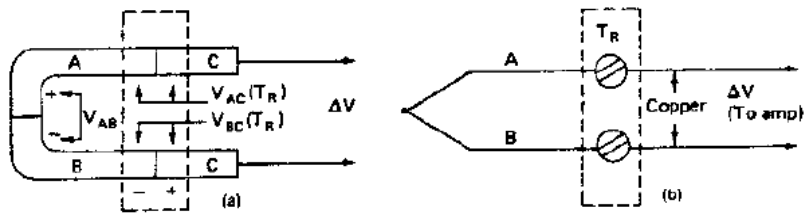
di mana 37,5 dan 0,045 merupakan dua konstanta C_1 dan C_2 untuk termokopel tembaga/konstanta.

Gambar 3.17 Beda potensial pada

Bila ujung logam yang tidak dipanaskan dihubung singkat, perambatan panas dari ujung panas ke ujung dingin akan semakin cepat. Sebaliknya bila suatu termokopel diberi tegangan listrik DC, maka diujung sambungan terjadi panas atau menjadi dingin tergantung polaritas bahan (deret Volta) dan polaritas tegangan sumber. Dari prinsip ini memungkinkan membuat termokopel menjadi pendingin.

Thermocouple sebagai sensor temperatur memanfaatkan beda *workfunction* dua bahan metal

Gambar 3.18 Hubungan Termokopel (a) titik beda potensial
(b) daerah pengukuran dan titik referensi

Pengaruh sifat thermocouple pada *wiring*

$$\Delta V = V_{AB}(T) + V_{CA}(T_R) + V_{BC}(T_R)$$

$$\Delta V = V_{AB}(T) - V_{BA}(T_R)$$

Gambar 3.19 Tegangan referensi pada titik sambungan:
(a) Jumlah tegangan tiga buah metal (b) Blok titik sambungan

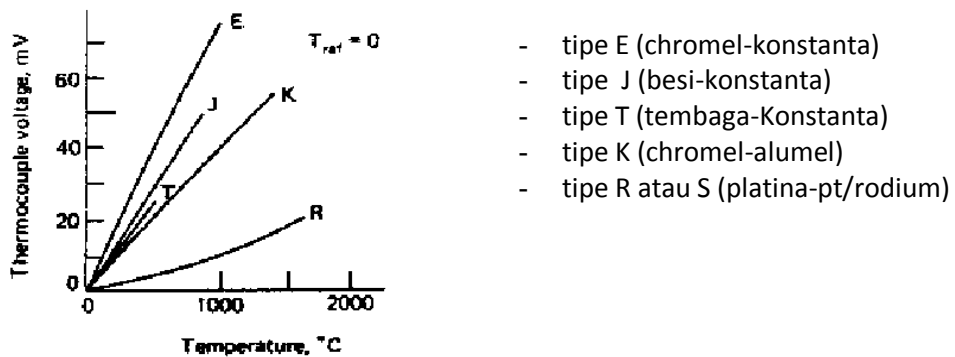
Sehingga diperoleh rumus perbedaan tegangan :

$$\Delta V = V_T^o - V_J^o$$

Rangkaian kompensasi untuk Thermocouple diperlihat oleh gambar 3.18

Gambar 3.20 Rangkaian penguat tegangan junction termokopel

Perilaku beberapa jenis thermocouple diperlihatkan oleh gambar 3.19

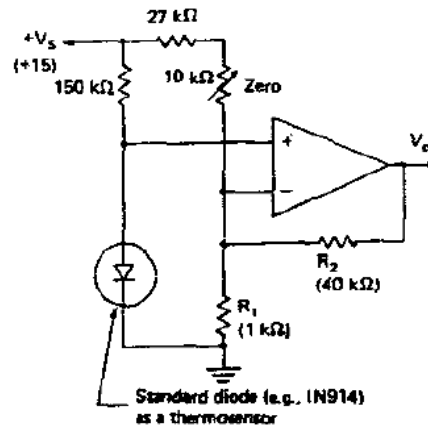
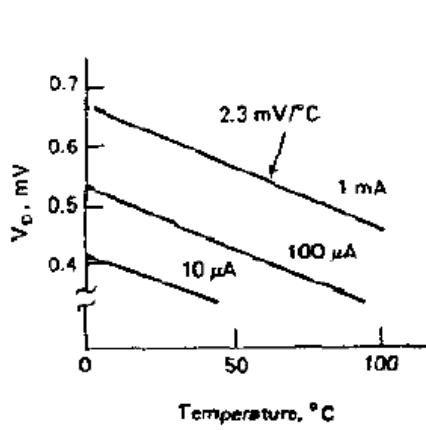
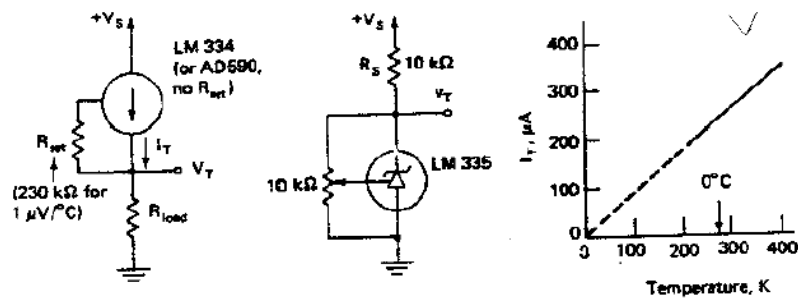
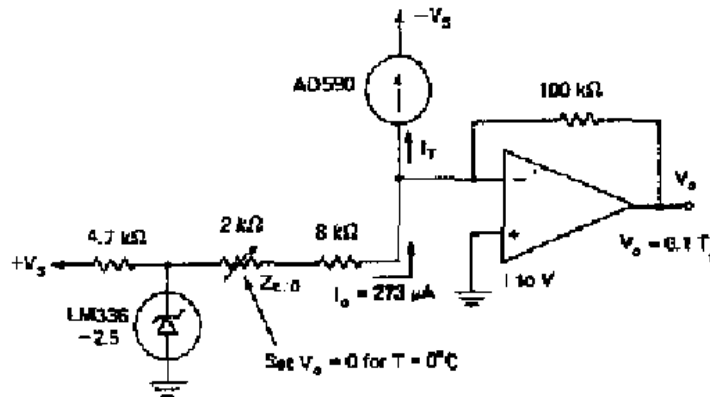
- tipe E (chromel-konstanta)
- tipe J (besi-konstanta)
- tipe T (tembaga-Konstanta)
- tipe K (chromel-alumel)
- tipe R atau S (platina-pt/rodium)

Gambar 3.21 Karateristik beberapa tipe termokopel

5) Dioda sebagai Sensor Temperatur

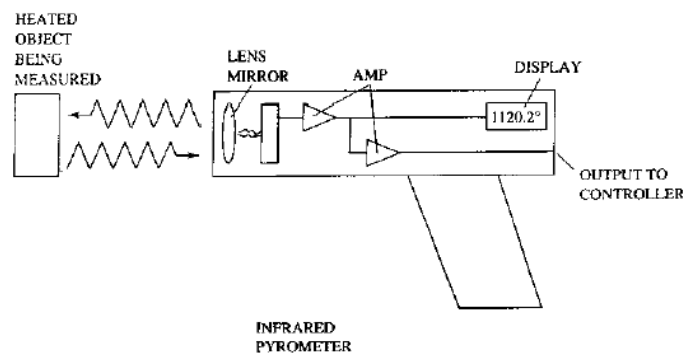
Dioda dapat pula digunakan sebagai sensor temperatur yaitu dengan memanfaatkan sifat tegangan *junction*

$$I_D = I_S \exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right)$$

Dimanfaatkan juga pada sensor temperatur rangkaian terintegrasi (memiliki rangkaian penguat dan kompensasi dalam chip yang sama).

Contoh rangkaian dengan dioda sebagai sensor temperature

Contoh rangkaian dengan IC sensor

Rangkaian alternatif untuk mengubah arus menjadi tegangan pada IC sensor temperature

Gambar 3.22 Rangkaian peubah arus ke tegangan untuk IC termo sensor

6) Infrared Pyrometer

Sensor inframerah dapat pula digunakan untuk sensor temperatur

Gambar 3.23 Infrared Pyrometer sebagai sensor temperatur

Memfaatkan perubahan panas antara cahaya yang dipancarkan dengan diterima yang diterima pyrometer terhadap objek yang di deteksi.

Contoh Soal

1. Sebutkan beberapa macam jenis sensor thermal yang anda ketahui

2. Jelaskan cara kerja sensor bimetal dan contoh pemakaiannya.

3. Ada berapa jenis sensor termistor yang anda ketahui

4. Jelaskan cara operasi sensor termokopel dalam sistem pengukuran

Jawaban Soal

1. Jenis-jenis sensor thermal antara lain : bimetal, termistor, RTD, Termokopel, IC Hybrid, Infrared pyrometer.
2. Sensor bimetal terdiri dari dua lempengan logam yang berbeda panas jensinya dan disatukan. Bimetal bekerja apabila didekatkan dengan sumber panas yang terkondisi, maka bimetal akan membengkok kearah bahan logam yang panas jenisnya lebih rendah.
3. Jensi termistor ada 3 macam antara lain : coated-bead, disk, dioda case dan thin-film
4. Termokopel terdiri dari dua buah logam yang berbeda panas jensinya yang salah satu ujungnya disatukan. Bila ujung yang disatukan di panaskan maka sisi ujung lainnya akan menghasilkan tegangan yang dapat di ukur.

2. Sensor Mechanik

Pergerakkan mekanis adalah tindakan yang paling banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, seperti perpindahan suatu benda dari suatu posisi ke posisi lain, kecepatan mobil di jalan raya, dongrak mobil yang dapat mengangkat mobil seberat 10 ton, debit air didalam pipa pesat, tinggi permukaan air dalam tanki.

Semua gerak mekanis tersebut pada intinya hanya terdiri dari tiga macam, yaitu gerak lurus, gerak melingkar dan gerak memuntir. Gerak

mekanis disebabkan oleh adanya gaya aksi yang dapat menimbulkan gaya reaksi. Banyak cara dilakukan untuk mengetahui atau mengukur gerak mekanis misalnya mengukur jarak atau posisi dengan meter, mengukur kecepatan dengan tachometer, mengukur debit air dengan rotameter dsb. Tetapi jika ditemui gerakan mekanis yang berada dalam suatu sistem yang kompleks maka diperlukan sebuah sensor untuk mendeteksi atau mengimformasikan nilai yang akan diukur. Berikut akan dijabarkan beberapa jenis sensor mekanis yang sering dijumpai di dalam kehidupan sehari-hari.

2.1 Sensor Posisi

Pengukuran posisi dapat dilakukan dengan cara analog dan digital. Untuk pergeseran yang tidak terlalu jauh pengukuran dapat dilakukan menggunakan cara-cara analog, sedangkan untuk jarak pergeseran yang lebih panjang lebih baik digunakan cara digital.

Hasil sensor posisi atau perpindahan dapat digunakan untuk mengukur perpindahan linier atau angular. Teknis perlakuan sensor dapat dilakukan dengan cara terhubung langsung (kontak) dan tidak terhubung langsung (tanpa kontak).

a) Strain gauge (SG)

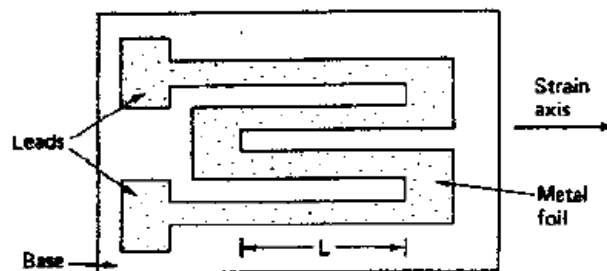
Strain gauge dapat dijadikan sebagai sensor posisi. SG dalam operasinya memanfaatkan perubahan resistansi sehingganya dapat digunakan untuk mengukur perpindahan yang sangat kecil akibat pembengkokan (*tensile stress*) atau peregangan (*tensile strain*). Definisi elastisitas (ε) strain gauge adalah perbandingan perubahan panjang (ΔL) terhadap panjang semula (L) yaitu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

atau perbandingan perubahan resistansi (ΔR) terhadap resistansi semula (R) sama dengan faktor gage (G_f) dikali elastisitas starin gage (ε) :

$$\frac{\Delta R}{R} = G_f \, \varepsilon$$

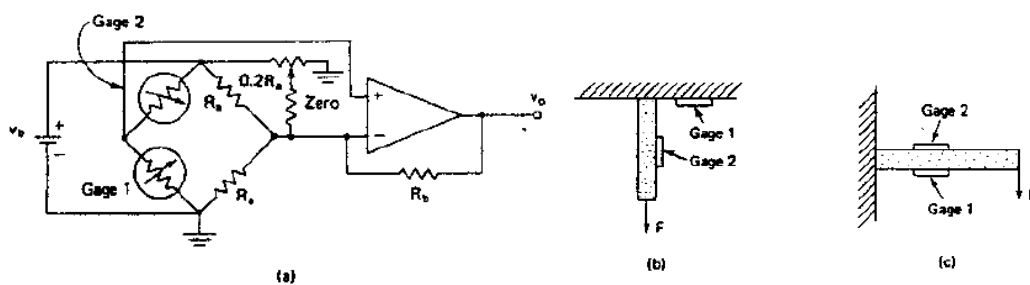
Secara konstruksi SG terbuat dari bahan metal tipis (foil) yang diletakkan diatas kertas. Untuk proses pendeteksian SG ditempelkan dengan benda uji dengan dua cara yaitu:

1. Arah perapatan/peregangan dibuat sepanjang mungkin (axial)
2. Arah tegak lurus perapatan/peregangan dibuat sependek mungkin (lateral)

Gambar 3.24 Bentuk phisik strain gauge

Faktor gauge (G_f) merupakan tingkat elastisitas bahan metal dari SG.

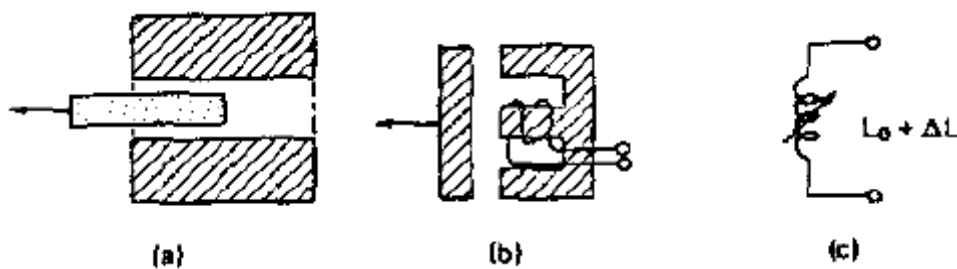
- metal incompressible Gf = 2
- piezoresistif Gf =30
- piezoresistif sensor digunakan pada IC sensor tekanan

Untuk melakukan sensor pada benda uji maka rangkaian dan penempatan SG adalah

- disusun dalam rangkaian jembatan
- dua strain gauge digunakan berdekatan, satu untuk peregangan/perapatan , satu untuk kompensasi temperatur pada posisi yang tidak terpengaruh peregangan/ perapatan
- respons frekuensi ditentukan masa tempat strain gauge ditempatkan

Gambar 3.25 Pemasangan strain gauge: (a) rangkaian jembatan
(b) gage1 dan gage 2 posisi 90 (c) gage 1 dan gage 2 posisi sejajar

b) Sensor Induktif dan Elektromagnet

Sensor induktif memanfaatkan perubahan induktansi

- sebagai akibat pergerakan inti feromagnetik dalam koil
- akibat bahan feromagnetik yang mendekat

Gambar 3.26 Sensor posisi: (a) Inti bergeser datar

(b) Inti I bergser berputar (c) Rangkaian variable induktansi

Rangkaian pembaca perubahan induktansi

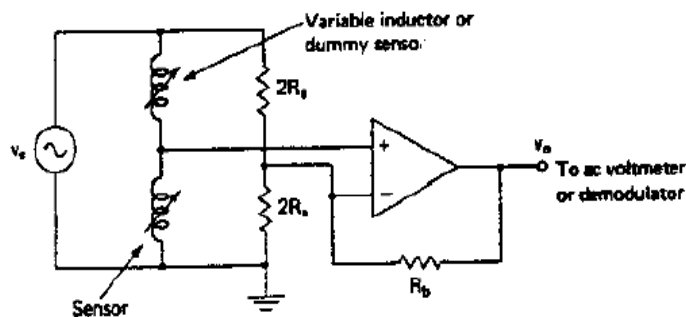
• dua induktor disusun dalam rangkaian jembatan, satu sebagai *dummy*

• tegangan bias jembatan berupa sinyal ac

• perubahan induktasi dikonversikan secara linier menjadi perubahan tegangan

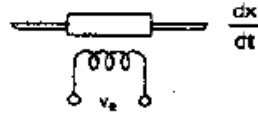
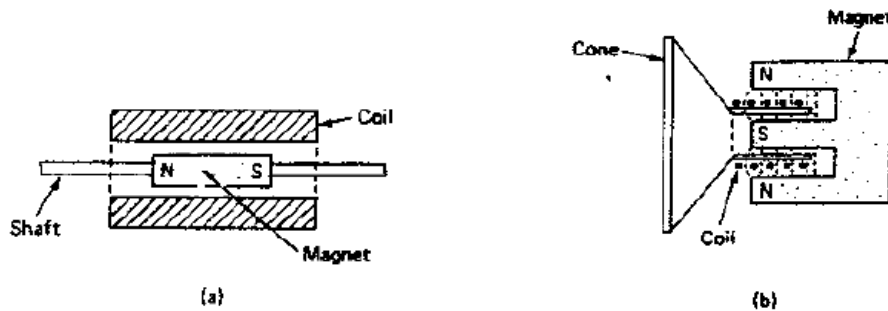
$$v_o = \frac{V_b}{4}\frac{R_b}{R_a} K_L\, x$$

K_L = sensistivitas induktansi terhadap posisi

• output tegangan ac diubah menjadi dc atau dibaca menggunakan detektor fasa

Gambar 3.27 Rangkaian uji sensor posisi induktif

Sensor elektromagnetik memanfatkan terbangkitkannya gaya emf oleh pada koil yang mengalami perubahan medan magnit

• output tegangan sebanding dengan kecepatan perubahan posisi koil terhadap sumber magnit

$$v_e = K_M \frac{dx}{dt}$$

• perubahan medan magnit diperoleh dengan pergerakan sumber medan magnit atau pergerakan koilnya (seperti pada mikrofon dan loudspeaker)

Gambar 3.28 Pemakaian sensor posisi: (a) pada microphone, (b) pada loudspeaker

c) Linier Variable Differential Transformer (LVDT)

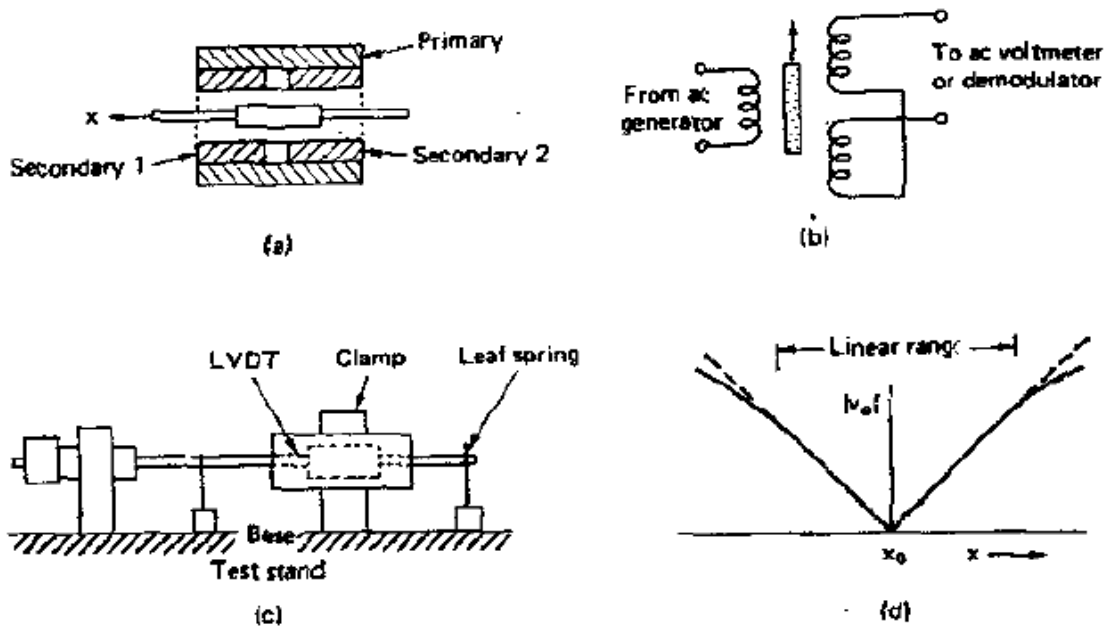
– memanfaatkan perubahan induksi magnit dari kumparan primer ke dua kumparan sekunder

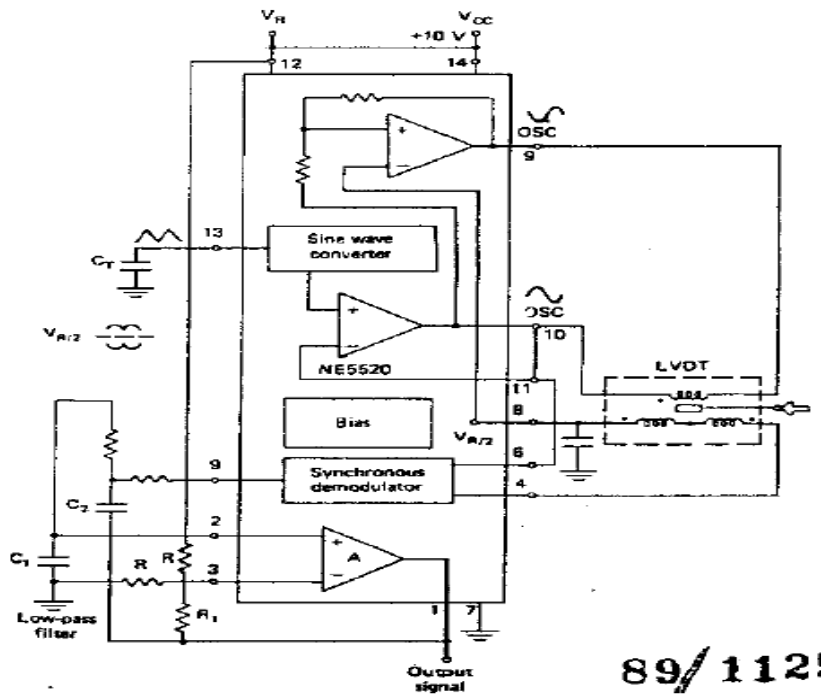
– dalam keadaan setimbang, inti magnet terletak ditengah dan kedua kumparan sekunder menerima fluks yang sama

– dalam keadaan tidak setimbang, fluks pada satu kumparan naik dan yang lainnya turun

– tegangan yang dihasilkan pada sekunder sebading dengan perubahan posisi inti magnetic

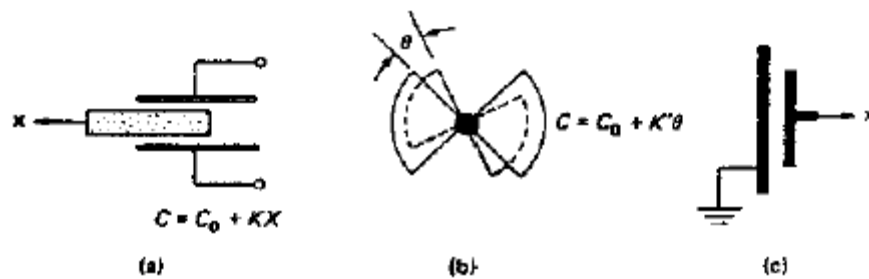
$$v_o = v_e K x$$

– hubungan linier bila inti masih disekitar posisi kesetimbangan

Gambar 3.29 LVDT sebagai sensor posisi: (a) konstruksi LVDT, (b) Rangakaian listrik, (c) rangkaia uji LVDT, (d) Karakteristik LVDT

– rangkaian detektor sensitif fasa pembaca perpindahan dengan LVDT

Gambar 3.30 Rangkain uji elektronik LVDT

d) Transduser Kapasitif

– memanfaatkan perubahan kapasitansi

- akibat perubahan posisi bahan dielektrik diantara kedua keping
- akibat pergeseran posisi salah satu keping dan luas keping yang berhadapan langsung
- akibat penambahan jarak antara kedua keeping

Gambar 3.31 Sensor posisi kapasitif: (a) pergeseran media mendatar, (b) pergeseran berputar, (c) pergeseran jarak plat

– nilai kapasitansi berbanding lurus dengan area dan berbanding terbaik dengan jarak

$$C = 0{,}0885 \frac{A}{d} k$$

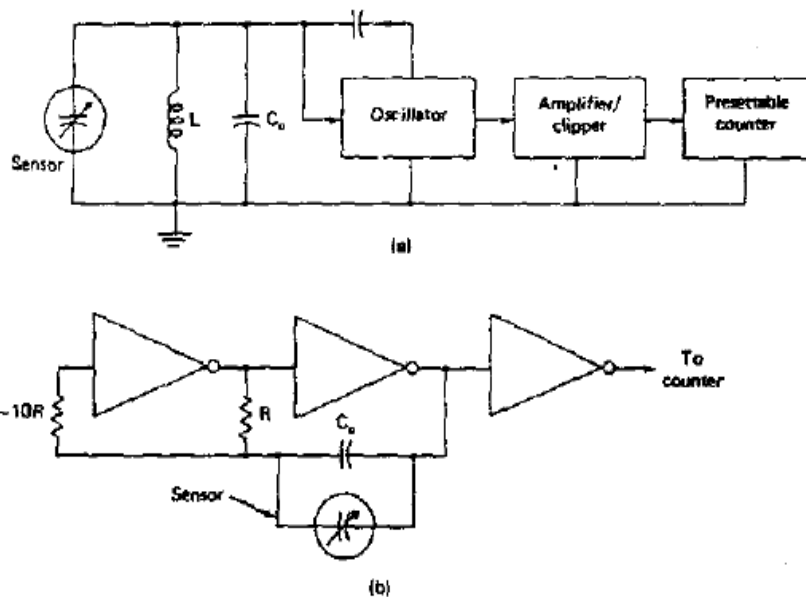
– cukup sensitif tetapi linieritas buruk

– rangkaian jembatan seperti pada sensor induktif dapat digunakan dengan kapasitor dihubungkan paralel dengan resistansi (tinggi) untuk memberi jalur DC untuk input opamp

– alternatif kedua mengubah perubahan kapasitansi menjadi perubahan frekuensi osilator

- frekuensi tengah 1 - 10 MHz

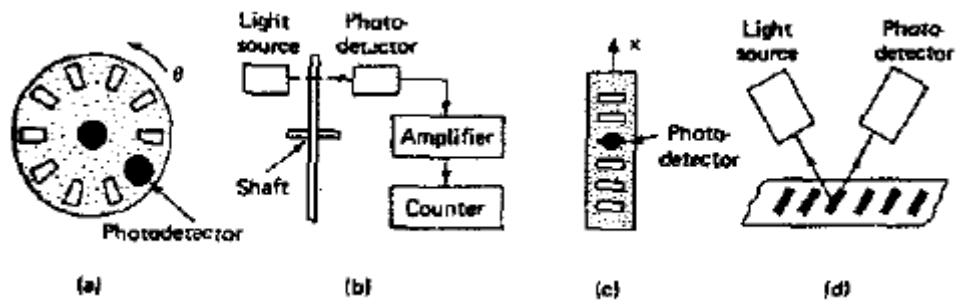
• perubahan frekuensi untuk perubahan kapasitansi cukup kecil dibandingkan kapasitansi Co

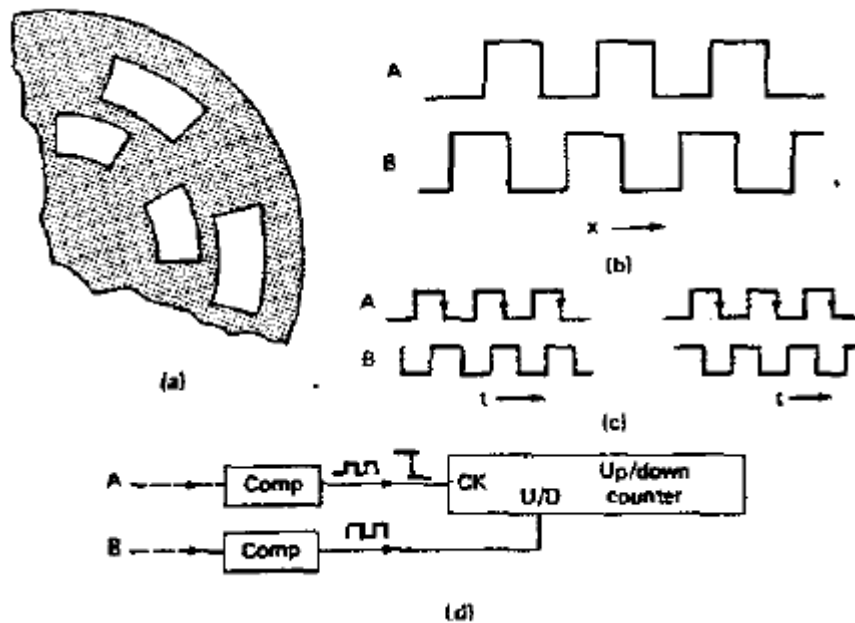
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{-\Delta C}{2C}$$

Gambar 3.32 Pemakaian sensor posisi pada rangkaian elektronik: (a) kapasitansi menjadi frekuensi, (b) kapasitansi menjadi pulsa

– Solusi rangkaian murah dengan osilator relaksasi dual inverter CMOS

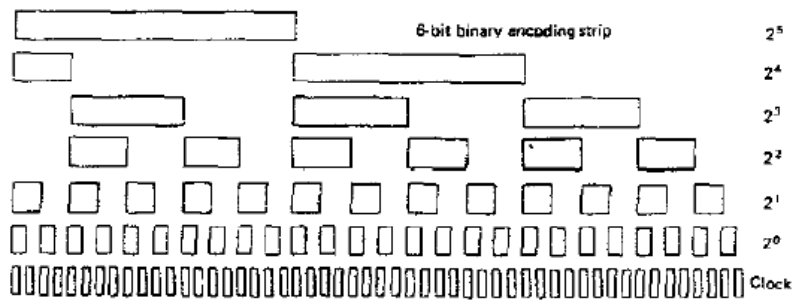
e) Transduser perpindahan digital optis

– mendeteksi posisi melalui kode oleh pemantul atau pelalu transmisi cahaya ke detektor foto

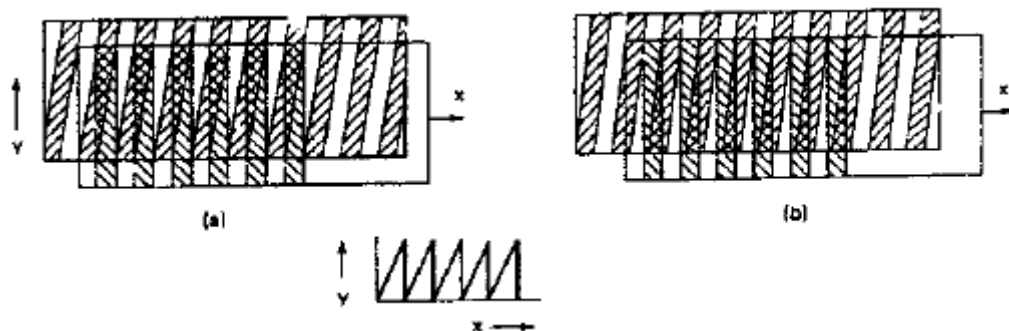
– perpindahan (relatif) diukur berupa pulse train dengan frekuensi yang sebanding kecepatan pergerakan

Gambar 3.33 Sensor posisi digital optis: (a) dan (b) pergeseran berputar, TX-RX sejajar, (c) dan (d) pergeseran mendatar, TX-RX membentuk sudut.

– deteksi arah gerakan memanfaatkan dua sinyal dengan saat pulsa naik berbeda

Gambar 3.34 Rangakain uji untuk menentukan arah gerakan/posisi

– posisi mutlak dideteksi menggunakan kode bilangan digital

- untuk deteksi perubahan yang ekstrim satu kode digunakan sebagai sinyal clock
- alternatif lain memanfaatkan kode yang hanya mengijinkan satu perubahan seperti pada kode Gray
- kode angular lebih baik dari pada kode linier akibat arah ekpansi thermal pada pelat kode

Gambar 3.35 Pulsa clock yang dihasilkan berdasarkan bilangan biner

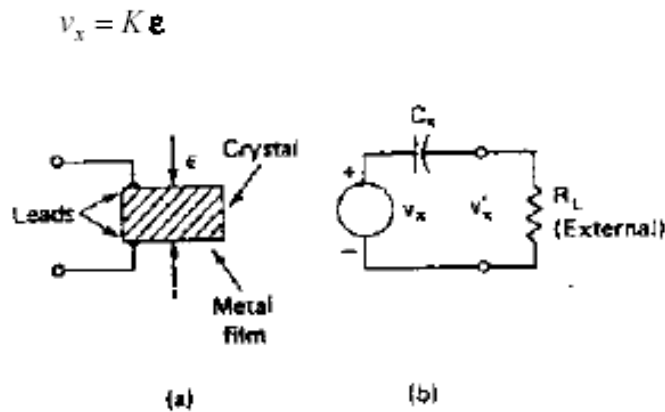
– pengukuran perpindahan posisi yang kecil dapat dilakukan dengan pola Moire

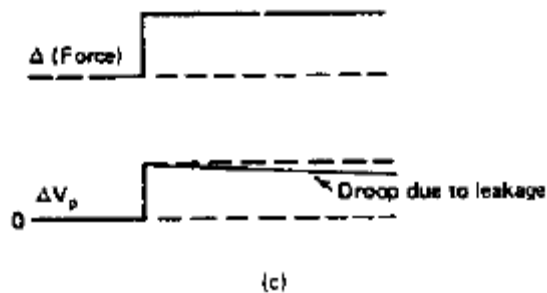
- pola garis tegak dan miring memperkuat (ukuran) pergeseran arah x ke pola garis pada arah y
- perubahan dibaca dengan cara optis

Gambar 3.36 Perubahan posisi kecil menggunakan cara Moire

f) Transduser Piezoelectric

Transduser Piezoelectric berkeja memanfaatkan tegangan yang terbentuk saat kristal mengalami pemampatan

- ion positif dan negatif terpisah akibat struktur kristal asimetris
- bahan kristal: kuarsa dan barium titanat, elektret polivilidin florida
- bentuk respons

$$v_x = K\varepsilon$$

Gambar 3.37 Transduser Piezoelektrik: (a) konstruksi PE,

(b) rangkaian ekivalen PE

Gambar 3.38   Respons Tegangan PE

Rangkaian pembaca tegangan pada piezoelektrik sensor

- kristal bukan konduktor (tidak mengukur DC, rangkaian ekivalen) gunakan rangkaian Op-Amp dengan impedansi input tinggi (FET, untuk frekuensi rendah)

• bila respons yang diukur dekat dengan frekuensi resonansi kristal, ukur muatan sebagai ganti tegangan

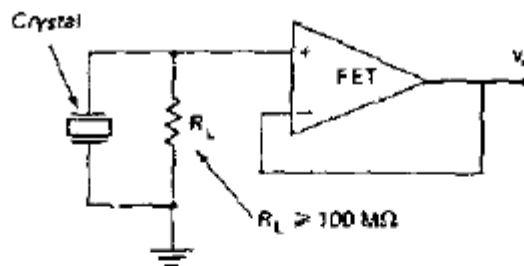
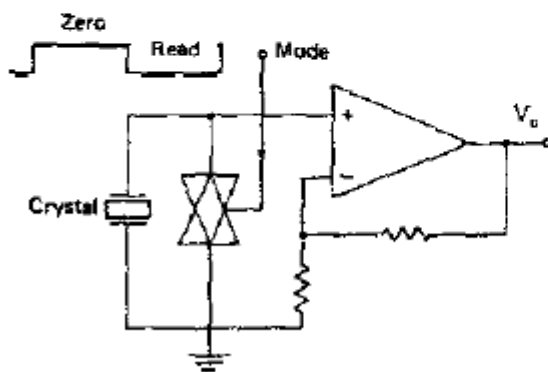
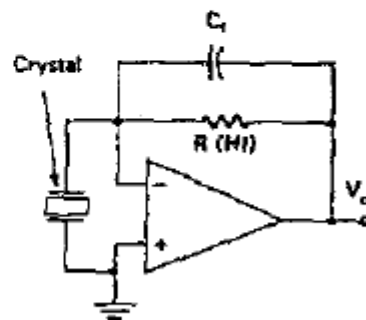
$$Q_x = K_{q\varepsilon}\, \varepsilon$$

di mana Q_x = muatan listrik kristal (coulomb)

K_{qe} = konstanta kristal (coul/cm)

ε = gaya tekan (Newton)

• Gambar (a) R tinggi untuk alur DC, (b) saklar untuk mengukur tegangan strain saat ON dan OFF dan (c) mengukur muatan, tegangan (V_o)yang dihasilkan adalah :

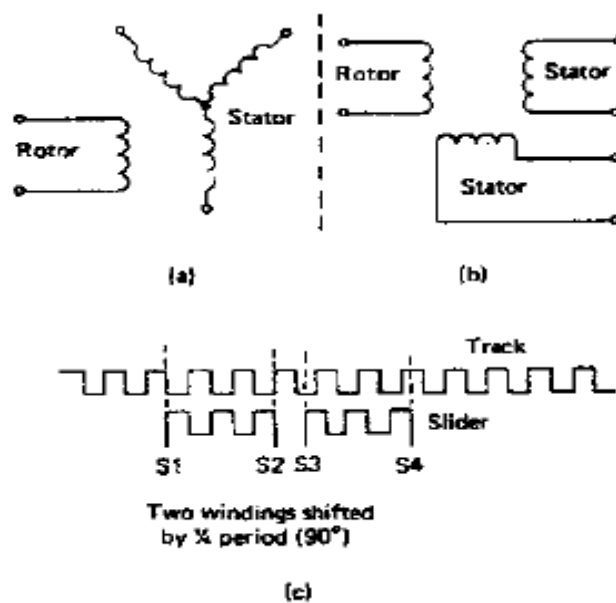
$$v_o = \frac{Q_x}{C_f} = \left(\frac{K_{q\varepsilon}}{C_f}\right)\varepsilon = K_{\mu\varepsilon}\left(\frac{C_x}{C_f}\right)$$

Gambar 3.39 Rangkaian pembacaan tegangan kristal

g) Transduser Resolver dan Inductosyn

– berupa pasangan motor-generator: resolver dan transmiter digunakan untuk mengukur sudut pada sebuah gerakan rotasi

– kumparan stator sebagai penerima ditempatkan pada sudut yang berbeda

- 3 stator: syncho
- 2 stator: resolver

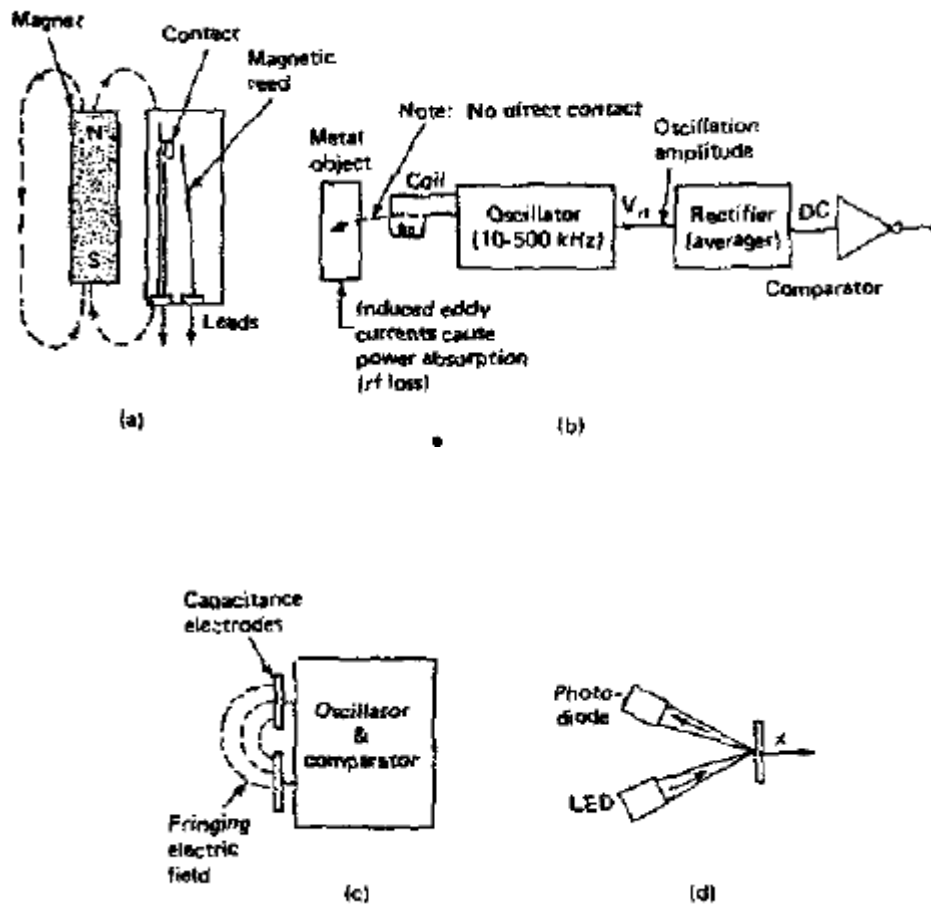
– versi linier (inductosyn) perbedaan sudut 90 derajat diperoleh dengan perbedaan 1/4 gulungan

Gambar 3.40 Konstruksi Resolver - Inductosyn dan sinyal yang dihasilkan

h) Detektor Proximity

– (a) saklar reed yang memanfatkan saklar yang terhubung atau terlepas berdasarkan medan magnet

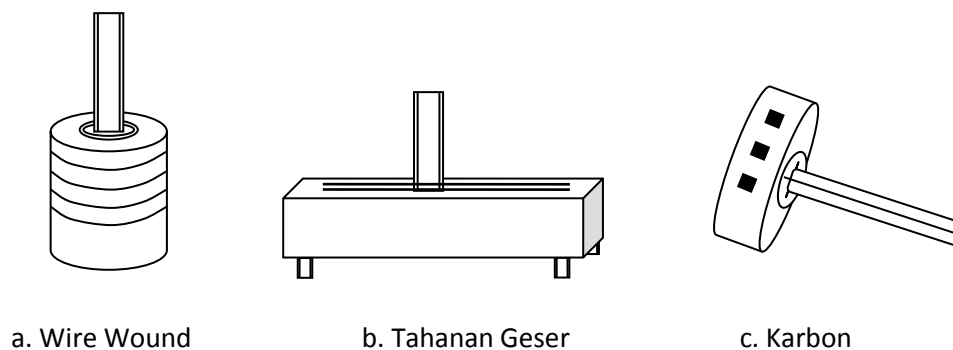
– (b) RF-lost akibat adanya bahan metal yang menyerap medan magnet (frekuensi 40-200 kHz) yang mengakibatkan detector RF turun akibat pembebanan rangkaian resonansi LC pada osilator

– (c) Detector kapasitansi mengamati perubahan kapasitansi oleh bahan nonkonduktor

– (d) pancaran cahaya terfokus

Gambar 3.41 Beberapa sensor proximity

i) Potensiometer

Potensiometer yang tersedia di pasaran terdiri dari beberapa jenis, yaitu: potensiometer karbon, potensiometer wire wound dan potensiometer metal film.

1. Potensiometer karbon adalah potensiometer yang terbuat dari bahan karbon harganya cukup murah akan tetapi kepressian potensiometer ini sangat rendah biasanya harga resistansi akan sangat mudah berubah akibat pergeseran kontak.
2. Potensiometer gulungan kawat (wire wound) adalah potensiometer yang menggunakan gulungan kawat nikelin yang sangat kecil ukuran penampangnya. Ketelitian dari potensiometer jenis ini tergantung dari ukuran kawat yang digunakan serta kerapihan penggulungannya.
3. Metal film adalah potensiometer yang menggunakan bahan metal yang dilapiskan ke bahan isolator

Gambar 3.42 Macam Potensiometer

Potensiometer karbon dan metal film jarang digunakan untuk kontrol industri karena cepat aus. Potensiometer wire wound adalah potensiometer yang menggunakan kawat halus yang dililit pada batang metal. Ketelitian potensiometer tergantung dari ukuran kawat. Kawat yang digunakan biasanya adalah kawat nikelin.

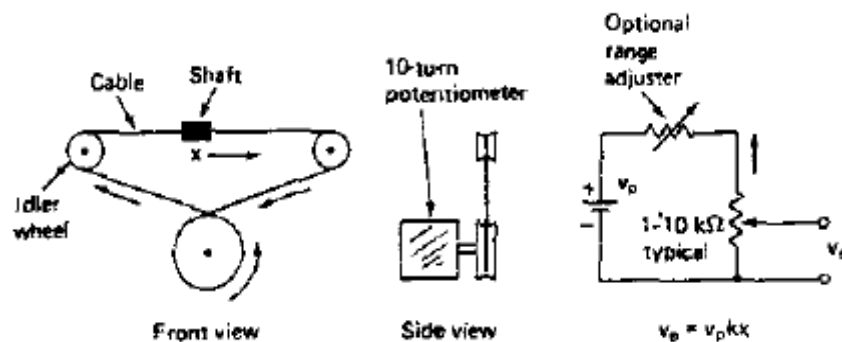
Penggunaan potensiometer untuk pengontrolan posisi cukup praktis karena hanya membutuhkan satu tegangan eksitasi dan biasanya tidak membutuhkan pengolah sinyal yang rumit. Kelemahan penggunaan potensiometer terutama adalah:

1. Cepat aus akibat gesekan

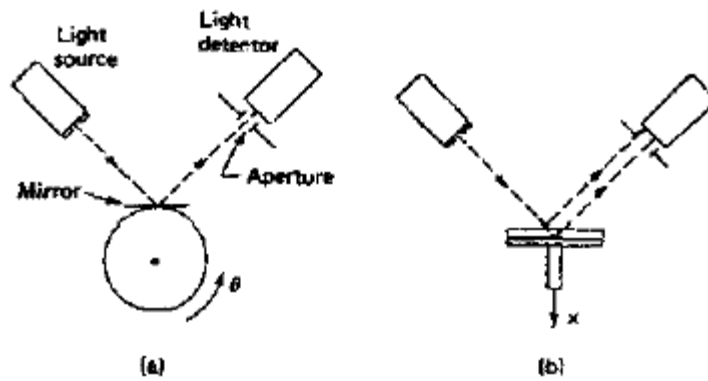
2. Sering timbul noise terutama saat pergantian posisi dan saaat terjadi lepas kontak

3. Mudah terserang korosi

4. Peka terhadap pengotor

Potensiometer linier adalah potensiometer yang perubahan tahanannya sangat halus dengan jumlah putaran sampai sepuluh kali putaran (multi turn). Untuk keperluan sensor posisi potensiometer linier memanfaatkan perubahan resistansi, diperlukan proteksi apabila jangkauan ukurnya melebihi rating, linearitas yang tinggi hasilnya mudah dibaca tetapi hati-hati dengan friksi dan backlash yang ditimbulkan, resolusinya terbatas yaitu 0,2 – 0,5%

Gambar 3.43 Rangkaian uji Potensiometer

j) Optical lever displacement detektor

- memanfaatkan pematulan berkas cahaya dari sumber ke detektor
- linieritas hanya baik untuk perpindahan yang kecil

Gambar 3.44 Optical Lever Displacement Detector

2.2 Sensor Kecepatan (*Motion Sensor*)

Pengukuran kecepatan dapat dilakukan dengan cara analog dan cara digital. Secara umum pengukuran kecepatan terbagi dua cara yaitu: cara angular dan cara translasi. Untuk mengukur kecepatan translasi dapat diturunkan dari cara pengukuran angular. Yang dimaksud dengan pengukuran angular adalah pengukuran kecepatan rotasi (berputar), sedangkan pengukuran kecepatan translasi adalah kecepatan gerak lurus beraturan dan kecepatan gerak lurus tidak beraturan.

a. Tacho Generator

Sensor yang sering digunakan untuk sensor kecepatan angular adalah tacho generator. Tacho generator adalah sebuah generator kecil yang membangkitkan tegangan DC ataupun tegangan AC. Dari segi eksitasi tacho generator dapat dibangkitkan dengan eksitasi dari luar atau imbas elektromagnit dari magnit permanent.

Tacho generator DC dapat membangkitkan tegangan DC yang langsung dapat menghasilkan informasi kecepatan, sensitivitas tacho generator DC cukup baik terutama pada daerah kecepatan tinggi. Tacho generator DC yang bermutu tinggi memiliki kutub-kutub magnit yang banyak sehingga dapat menghasilkan tegangan DC dengan riak gelombang yang berfrekuensi tinggi sehingga mudah diratakan. Keuntungan utama dari

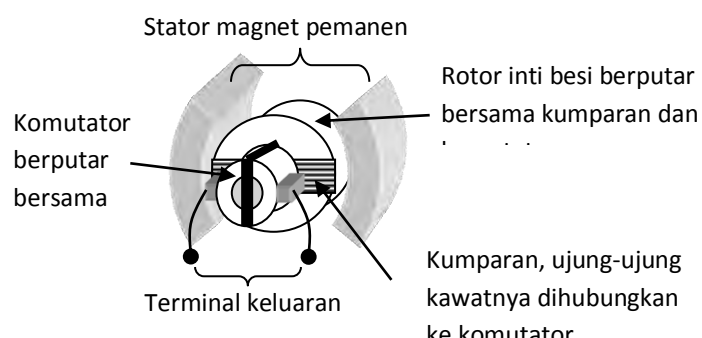
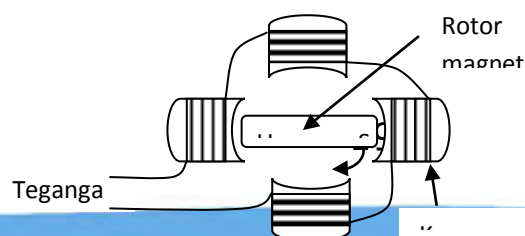
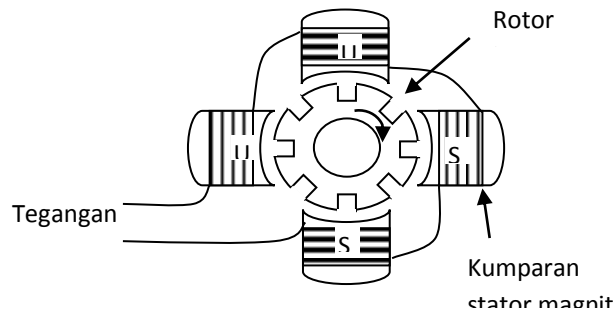
tacho generator ini adalah diperolehnya informasi dari arah putaran. Sedangakan kelemahannya adalah :

1. Sikat komutator mudah habis

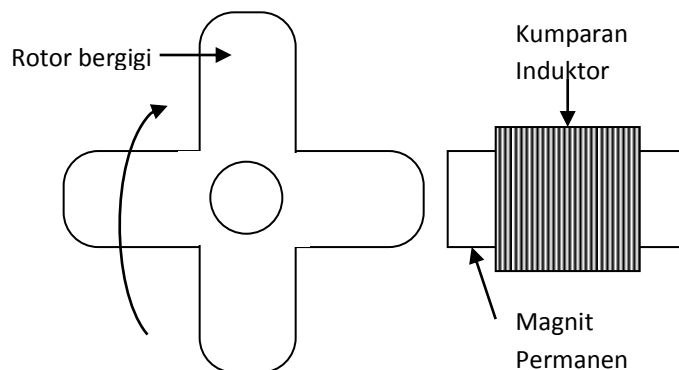
2. Jika digunakan pada daerah bertemperatur tinggi, maka magnet permanent akan mengalami kelelahan, untuk kasus ini, tacho generator sering dikalibrasi.

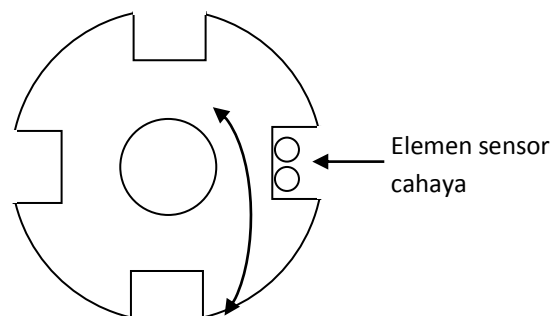
3. Peka terhadap debu dan korosi

Tacho generator AC berupa generator singkron, magnet permanent diletakkan dibagian tengah yang berfungsi sebagai rotor. Sedangkan statornya berbentuk kumparan besi lunak. Ketika rotor berputar dihasilkan tegangan induksi di bagian statornya. Tipe lain dari tacho generator AC adalah tipe induksi, rotor dibuat bergerigi, stator berupa gulungan kawat berinti besi. Medan magnet permanent dipasang bersamaan di stator. Ketika rotor berputar, terjadi perubahan medan magnet pada gigi yang kemudian mengimbas ke gulungan stator.

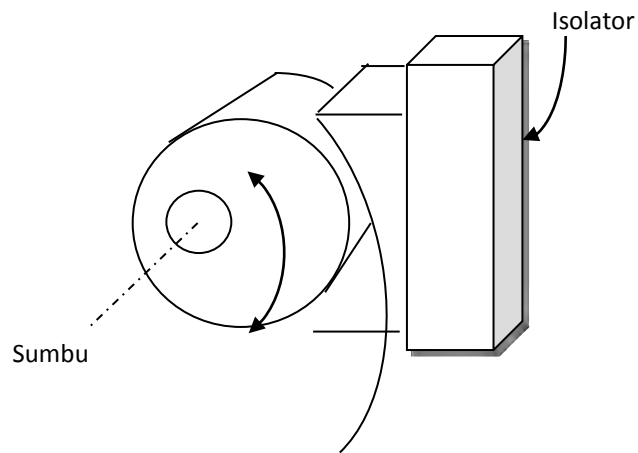
Kelebihan utama dari tacho generator AC adalah relatif tahan terhadap korosi dan debu, sedangkan kelemahannya adalah tidak memberikan informasi arah gerak.

Gambar 3.45 Kontruksi Tacho Generator DC

Gambar 3.46 Kontruksi Tacho Generator AC

Gambar 3.47 Kontruksi Tacho Generator AC dengan rotor bergerigi

b. Pengukuran Kecepatan Cara Digital.

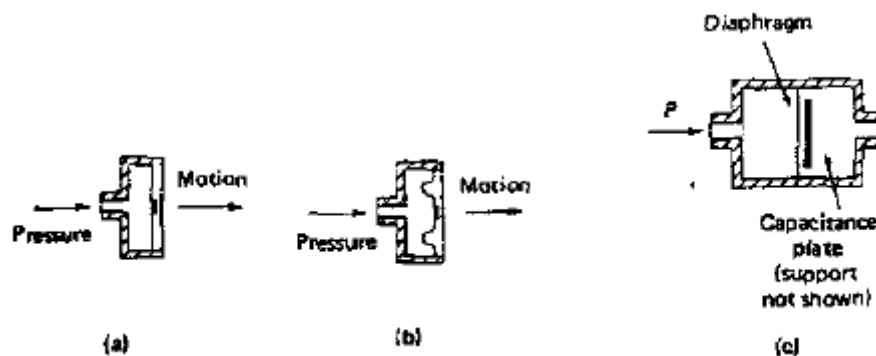
Pengukuran kecepatan cara digital dapat dilakukan dengan cara induktif, kapasitif dan optik. Pengukuran dengan cara induksi dilakukan menggunakan rotor bergerigi, stator dibuat dari kumparan yang dililitkan pada magnet permanen. Keluaran dari sensor ini berupa pulsa-pulsa tegangan. Penggunaan cara ini cukup sederhana, sangat praktis tanpa memerlukan kopling mekanik yang rumit, serta memiliki kehandalan yang tinggi, tetapi kelemahannya tidak dapat digunakan untuk mengukur kecepatan rendah dan tidak dapat menampilkan arah putaran.

Gambar 3.48 Sensor Kecepatan Digital Tipe Induktor

Tipe lain sensor kecepatan adalah cara Optik. Rotor dibuat dari bahan metal atau plastik gelap, rotor dibuat berlubang untuk memberi tanda kepada sensor cahaya. Bila diinginkan informasi arah kecepatan, digunakan dua buah sensor yang dipasang berdekatan. Informasi arah gerah dapat diperoleh dengan cara mendeteksi sensor mana yang lebioh dahulu mendapat sinar (aktif). Sensor cahaya sangat peka terhadap pengotor debu, olej karena itu keselurujan bagian sensor (stator dan rotor) harus diletakkan pada kemasan tertutup. Kelebihan sensor ini memiliki linearitas yang sangat tinggi untuk daerah jangkauan yang sangat luas. Kelemahannya adalah masih diperlukan adanya kopling mekanik dengan sistem yang di sensor.

Gambar 3.49 Sensor Kecepatan Cara Optik

Sensor kecepatan digital lain adalah menggunakan kapsitf, yaitu rotor dibuat dari bahan metal, bentuknya bulat. Rotor berputar dengan poros tidak sepusat atau bergeser kepinggir sedikit. Stator dibuat dari bahan metal dipasang dengan melengkung untuk memperbesar sensitivitas dari sensor. Ketika rotor diputar maka akan terjadi perubahan kapasitansi diantara rotor dan stator karena putaran rotor tidak simetris. Penerapan dari sensor ini

teruatama jika diperlukan pemasangan sensor kecepatan yang berada dilingkungan fluida.

Gambar 3.50 Sensor Kecepatan Cara Kapasitansi.

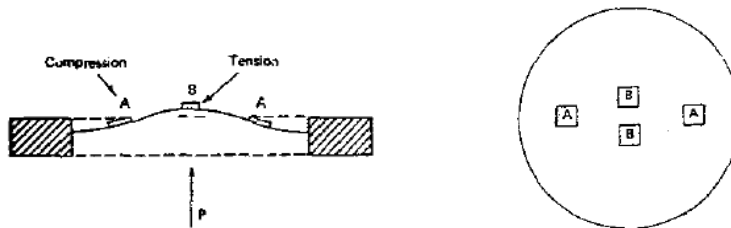
2.3 Sensor Tekanan (*Presure Sensor*)

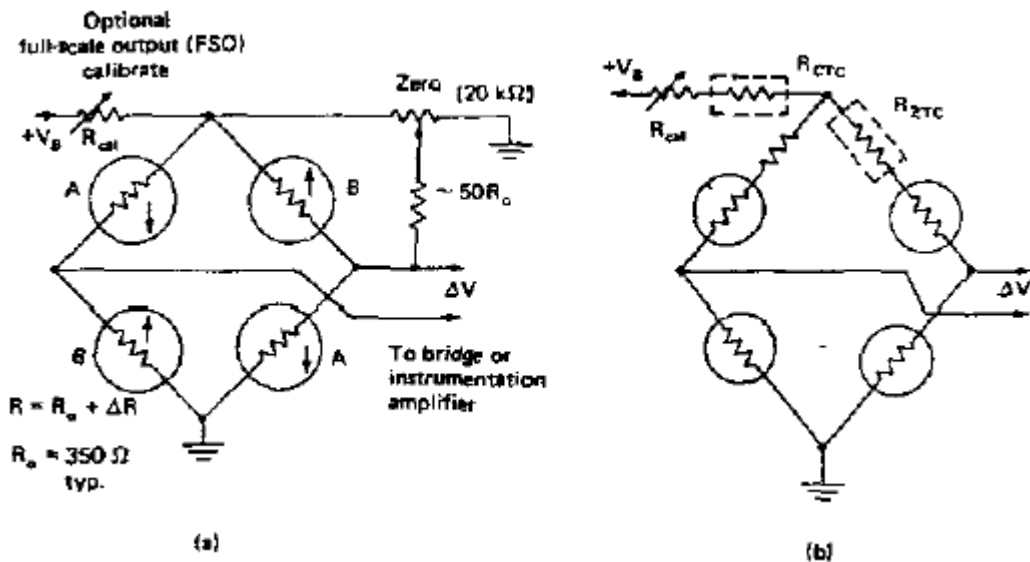
- Transduser tekanan dan gaya (load cell)
  - terdiri dari bahan elastis dan sensor perpindahan (displacement)
  - besaran ukur (i) strain atau (ii) displacement
  - pengelompokan: tipe *absolute gauge* dan diferensial

Gambar 3.51 Sensor tekanan diafragma: diafragma tipe datar,
(b) diafragma bergelombang, (c) media kapasistansi

• sensor tekanan dengan diafragma reliable, sukar dibuat, reproducible

– besaran ukur strain dengan strain gauge atau displacement dengan kapasitansi

– pengukuran dengan kapasitansi dalam rangkaian jembatan sangat sensitif dan mahal

– Penempatan dan rangkaian sensor

• rangkaian jembatan untuk kompensasi temperatur

• resistor sensitif temperatur baik dalam jembatan maupun pada regulator tegangan

Gambar 3.52 Rangkaian uji sensor tekanan strain gauge: (a) rangakaian jembatan tanpa kompensator, (b) rangakaian jembatan dengan kompensator

a. Transduser Tekanan silikon

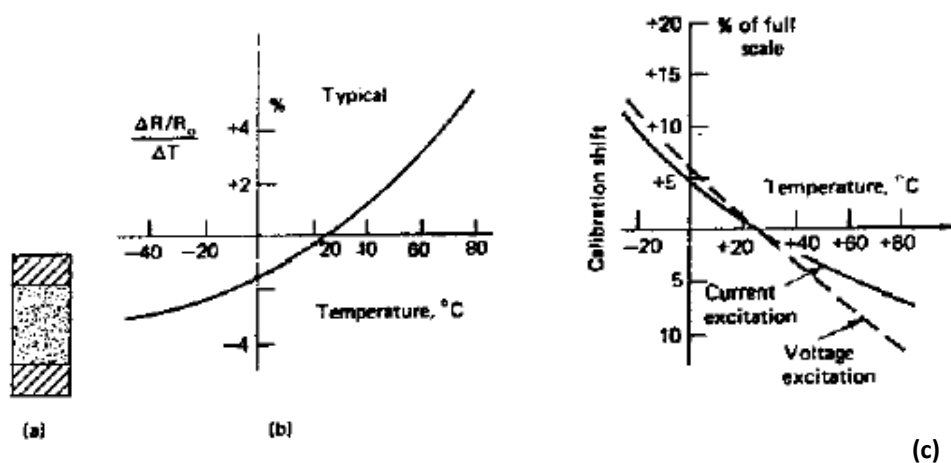
– memanfaatkan silikon sebagai bahan strain ukur dan diafragmanya, rangkaian bisa terintegrasi

– lebih sensistif dari metal karena strain (displacement) dan sifat piezoresistif muncul bersamaan

– selalu menggunakan 4 gauge dalam jembatan, masalah yang dihadapi

- gauge tidak identik
- sangat sensitif terhadap temperatur

– alternatif solusi:

- eksitasi arus
- kompensasi tegangan jembatan
- kompensasi penguatan amplifier

Gambar 3.53 Straingage piezoresistif:

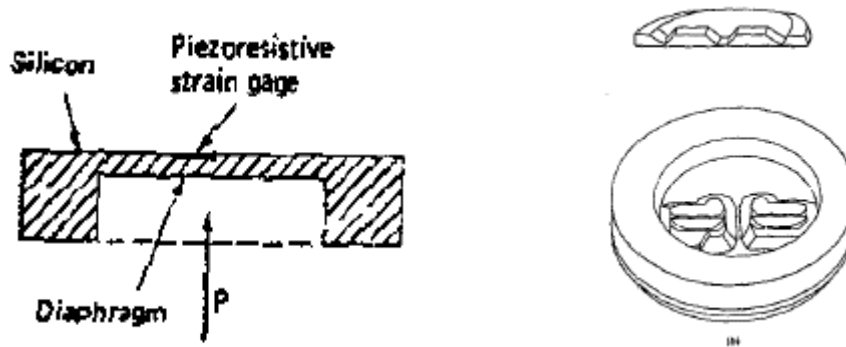
(a) phisik peizoresistif straingage,

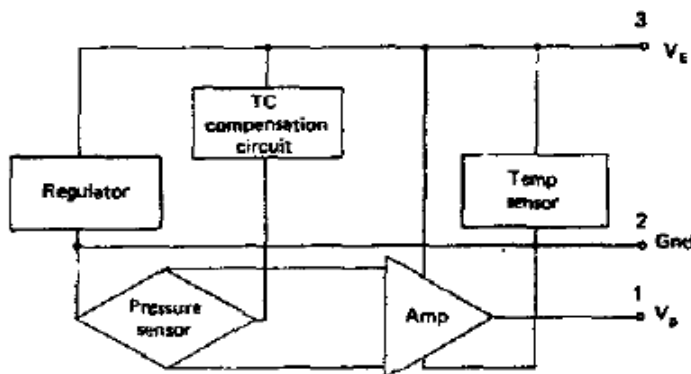
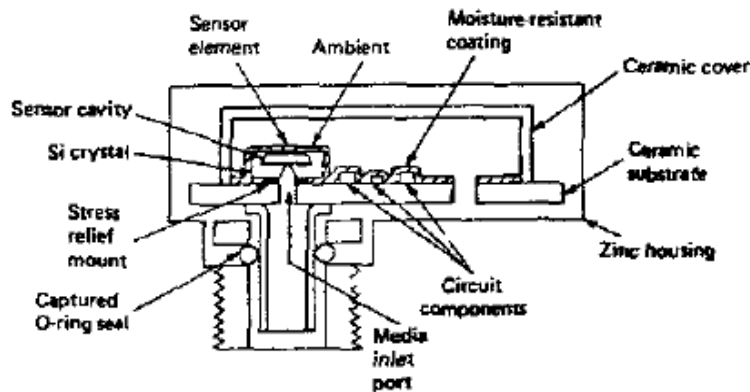
(b) karakteristik peizoresistif sg,

(c) respon temperatur pada konfigurasi jembatan

– konstruksi sensor tekanan silikon

• diafragma dengan proses etsa

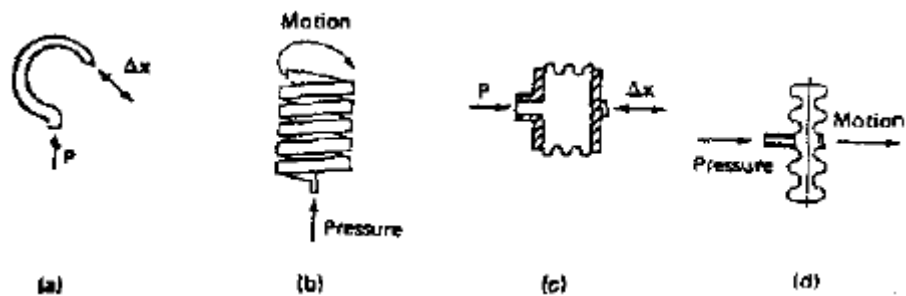
• strain gauge dengan difusi dopan

Gambar 3.54 Sensor tekanan jenis diafragma silicon: (a) diafragma datar, (b) diafragma melingkar lebih sensitif

– konstruksi paket sensor tekanan silikon dengan rangkaian kompensasi dan penguat

Gambar 3.55 Sensor tekanan semikonduktor:

(a) konstruksi sensor, (b)blok diagram rangkaian sensor

b. Sensor Tekanan Tipe Bourdon dan Bellow

– besaran ukur perpindahan (displacement) memanfaatkan LVDT, sensor reluktansi-variabel, potensiometer

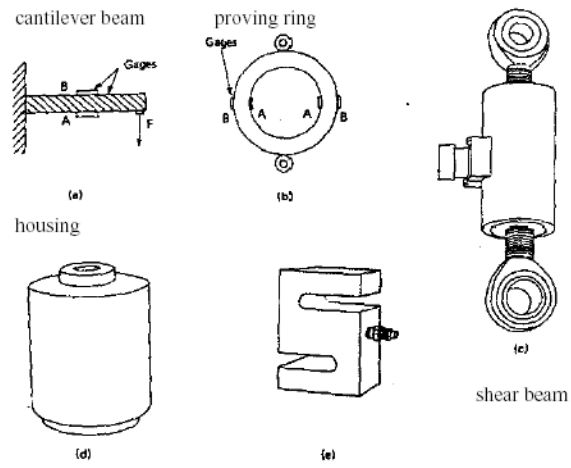
– konversi tekanan ke perpindahan menggunakan tabung Bourdon atau Bellows

Gambar 3.56 Sensor tekanan tipe lain: (a) dan (b) tipe Bourdon,(c) dan (d) tipe bellow

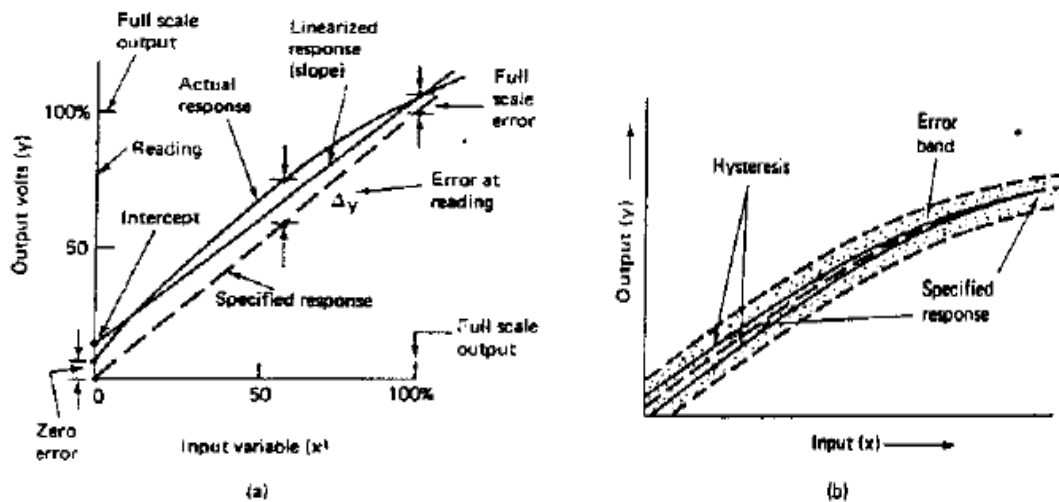
c. Load cell

– cara kerja mirip dengan sensor tekanan yaitu mengubah gaya menjadi perpindahan

– menggunakan rangkaian jembatan untuk pembacaan, kalibrasi dan kompensasi temperatur

– alternatif lain menggunakan kristal piezoelektrik untuk mengukur perubahan gaya

– konfigurasi load cell

Gambar 3.57 Beberapa Contoh Konfigurasi Load Cell

• Spesifikasi Error dan Nonlinearitas pada Sensor

Gambar 3.58 Respon sensor secara umum

(a) Simpangan dari garis linear (b) Bentuk sinyal terdefinisi

2.4 Sensor Aliran Fluida (*Flow Sensor*)

Pengukuran aliran mulai dikenal sejak tahun 1732 ketika Henry Pitot mengatur jumlah fluida yang mengalir. Dalam pengukuran fluida perlu ditentukan besaran dan vektor kecepatan aliran pada suatu titik dalam fluida dan bagaimana fluida tersebut berubah dari titik ke titik.

Pengukuran atau penyensoran aliran fluida dapat digolongkan sebagai berikut:

1. Pengukuran kuantitas

   Pengukuran ini memberikan petunjuk yang sebanding dengan kuantitas total yang telah mengalir dalam waktu tertentu. Fluida mengalir melewati elemen primer secara berturutan dalam kuantitas yang kurang lebih terisolasi dengan secara bergantian mengisi dan mengosongkan bejana pengukur yang diketahui kapasitasnya.

   Pengukuran kuantitas diklasifikasikan menurut :

   a. Pengukur gravimetri atau pengukuran berat
   b. Pengukur volumetri untuk cairan

c. Pengukur volumetri untuk gas

2. Pengukuran laju aliran

   Laju aliran Q merupakan fungsi luas pipa A dan kecepatan V dari cairan yang mengalir lewat pipa, yakni:

$$Q = A.V$$

tetapi dalam praktek, kecepatan tidak merata, lebih besar di pusat. Jadi kecepatan terukur rata-rata dari cairan atau gas dapat berbeda dari kecepatan rata-rata sebenarnya. Gejala ini dapat dikoreksi sebagai berikut:

$$Q = K.A.V$$

di mana K adalah konstanta untuk pipa tertentu dan menggambarkan hubungan antara kecepatan rata-rata sebenarnya dan kecepatan terukur. Nilai konstantaini bisa didapatkan melalui eksperimen. Pengukuran laju aliran digunakan untuk mengukur kecepatan cairan atau gas yang mengalir melalui pipa. Pengukuran ini dikelompokkan lagi menurut jemis bahan yang diukur, cairan atau gas, dan menurut sifat-sifat elemen primer sebagai berikut:

a. Pengukuran laju aliran untuk cairan:
   1) jenis baling-baling defleksi
   2) jenis baling-baling rotasi
   3) jenis baling-baling heliks
   4) jenis turbin
   5) pengukur kombinasi
   6) pengukur aliran magnetis
   7) pengukur aliran ultrasonic
   8) pengukur aliran kisaran (*vorteks*)
   9) pengukur pusaran (*swirl*)
b. Pengukuran laju aliran gas
   1) jenis baling-baling defleksi
   2) jenis baling-baling rotasi

3) jenis termal

3. Pengukuran metoda diferensial tekanan

Jenis pengukur aliran yang paling luas digunakan adalah pengukuran tekanan diferensial. Pada prinsipnya beda luas penampang melintang dari aliran dikurangi dengan yang mengakibatkan naiknya kecepatan, sehingga menaikan pula energi gerakan atau energi kinetis. Karena energi tidak bisa diciptakan atau dihilangkan (Hukum perpindahan energi), maka kenaikan energi kinetis ini diperoleh dari energi tekanan yang berubah..

Lebih jelasnya, apabila fluida bergerak melewati penghantar (pipa) yang seragam dengan kecepatan rendah, maka gerakan partikel masing-masing umumnya sejajar disepanjang garis dinding pipa. Kalau laju aliran meningkat, titik puncak dicapai apabila gerakan partikel menjadi lebih acak dan kompleks.

Kecepatan kira-kira di mana perubahan ini terjadi dinamakan kecepatan kritis dan aliran pada tingkat kelajuan yang lebih tinggi dinamakan *turbulen* dan pada tingkat kelajuan lebih rendah dinamakan *laminer.*

Kecepatan kritis dinamakan juga angka Reynold, dituliskan tanpa

$$R_D = \frac{D\rho V}{\mu}$$

dimensi:

di mana : D = dimensi penampang arus fluida, biasanya diameter

ρ = kerapatan fluida

V = kecepatan fluida

μ = kecepatan absolut fluida

Batas kecepatan kritisuntuk pipa biasanya berada diantara 2000 dan 2300.

Pengukuran aliran metoda ini dapat dilakukan dengan banyak cara misalnya: menggunakan pipa venturi, pipa pitot, orifice plat (lubang sempit), turbine flow meter, rotameter, cara thermal, menggunakan bahan radio aktif, elektromagnetik, ultar sonic dan flowmeter gyro. Cara lain dapat dikembangkan sendiri sesuai dengan kebutuhan proses. Yang dibahas dalam buku ini adalah sensor laju aliran berdasarkan perbedaan tekanan.

a. Sensor Aliran Berdasarkan Perbedaan Tekanan

Metoda ini berdasarkan Hukum Bernoulli yang menyatakan hubungan:

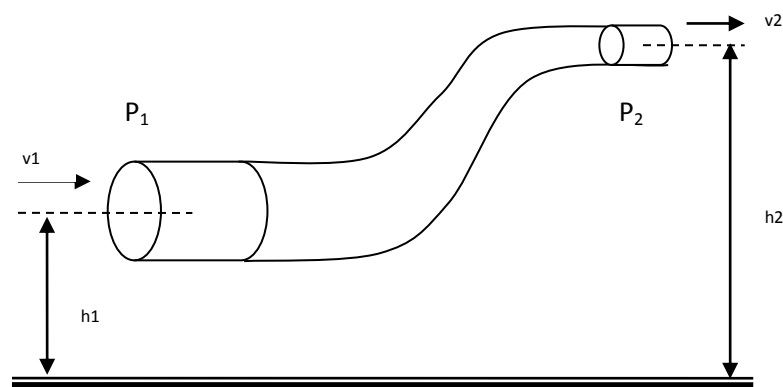
$$P_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^{\,2} + \rho.g.h_1 = P_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^{\,2} + \rho.g.h_2$$

dimana: P = tekanan fluida

ρ = masa jenis fluida

v = kecepatan fulida

g = gravitasi bumi

h = tinggi fluida (elevasi)

Gambar 3.59 Hukum Kontiunitas

Jika h_1 dan h_2 dibuat sama tingginya maka

$$P_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 \quad \text{atau} \quad \tfrac{1}{2}\rho.(v_1^2 - v_2^2) = P_2 + P_1$$

Perhatian : Rumus diatas hanya berlaku untuk aliran *Laminer,* yaitu aliran yang memenuhi prinsip kontinuitas.

Pipa pitot, orifice plate, pipa venturi dan flow Nozzle menggunakan hukum Bernoulli diatas. Prinsip dasarnya adalah membentuk sedikit perubahan kecepatan dari aliran fluida sehingga diperoleh perubahan tekanan yang dapat diamati. Pengubahan kecepatan aliran fluida dapat dilakukan dengan mengubah diameter pipa, hubungan ini diperoleh dari Hukum kontiunitas aliran fluida.

Perhatikan rumus berikut: $A_1.D_1 = A_2.D_2$, di mana : A = luas penampang pipa, B = debit fluida

Karena debit fluida berhubungan langsung dengan kecepatan fluida, maka jelas kecepatan fluida dapat diubah dengan cara mengubah diameter pipa.

b. Orifice Plate

Alat ukur terdiri dari pipa dimana dibagian dalamnya diberi pelat berlubang lebih kecil dari ukuran diameter pipa. Sensor tekanan diletakan disisi pelat bagian inlet (P_1) dan satu lagi dibagian sisi pelat bagian outlet (P_2). Jika terjadi aliran dari inlet ke outlet, maka tekanan P_1 akan lebih besar dari tekanan outlet P_2.

Keuntungan utama dari Orfice plate ini adalah dari :

1. Konstruksi sederhana

2. Ukuran pipa dapat dibuat persis sama dengan ukuran pipa sambungan.

3. Harga pembuatan alat cukup murah

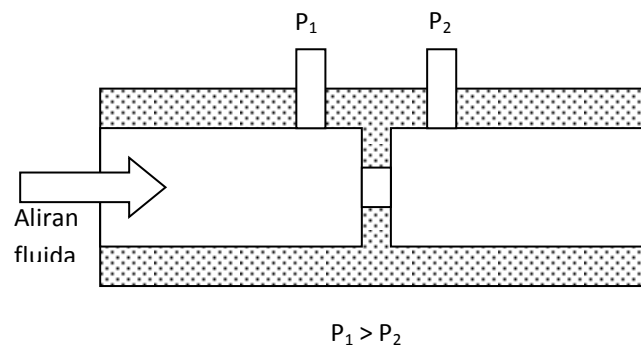
4. Output cukup besar

Kerugian menggunakan cara ini adalah :

1. Jika terdapat bagian padat dari aliran fluida, maka padat bagian tersebut akan terkumpul pada bagian pelat disisi inlet.

2. Jangkauan pengukuran sangat rendah

3. Dimungkinkan terjadinya aliran *Turbulen* sehingga menyebabkan kesalahan pengukuran jadi besar karena tidak mengikuti prinsip aliran *Laminer.*

4. Tidak memungkinkan bila digunakan untuk mengukur aliran fluida yang bertekanan rendah.

Gambar 3.60 Orifice Plate

$$Q = KA_2\sqrt{\frac{2g}{\rho}}\sqrt{P_1 - P_2}$$

Jumlah fluida yang mengalir per satuan waktu (m^3/dt) adalah :

di mana : Q = jumlah fluida yang mengalir (m^3/dt)

K = konstanta pipa

A_2 = luas penampang pipa sempit

P = tekanan fluida pada pipa 1 dan 2

ρ = masa jenis fluida

g = gravitasi bumi

Rumus ini juga berlaku untuk pipa venturi

c. Pipa Venturi

Bentuk lain dari pengukuran aliran dengan beda tekanan adalah pipa venture.

Pada pipa venture, pemercepat aliran fluida dilakukan dengan cara membentuk corong sehingga aliran masih dapat dijaga agar tetap laminar. Sensor tekana pertama (P_1) diletakkan pada sudut tekanan pertama dan sensor tekanan kedua diletakkan pada bagian yang plaing menjorok ke tengah. Pipa venturi biasa dipergunakan untuk mengukur aliran cairan.

Keuntungan dari pipa venturi adalah:

1.Partikel padatan masih melewati alat ukur

2. Kapasitas aliran cukup besar

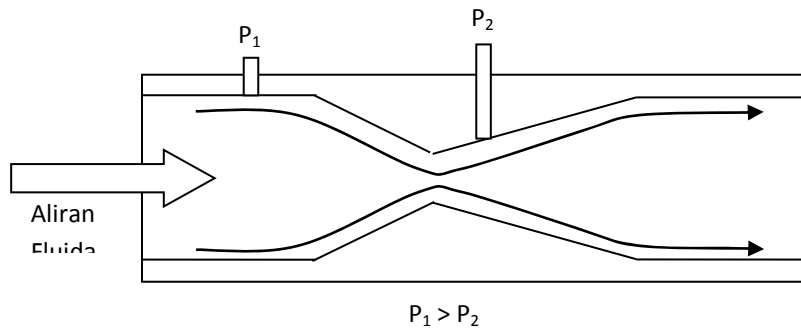
3. Pengukuran tekana lebih baik dibandingkan orifice plate.

4. Tahan terhadapa gesakan fluida.

Kerugiannya adalah:

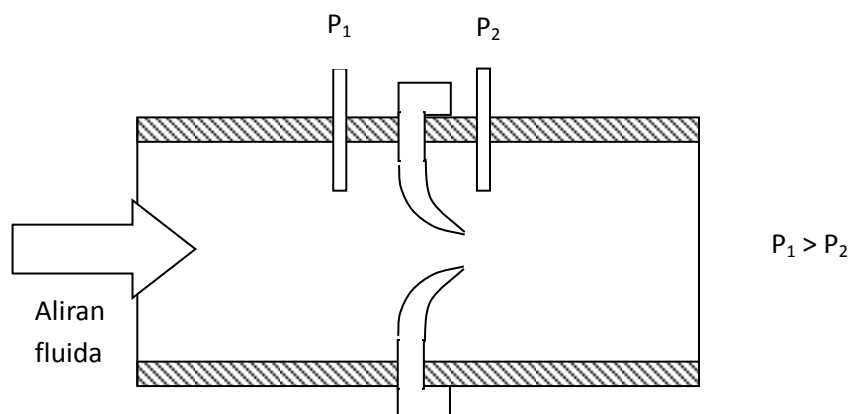
1. Ukuiran menjadi lebih besar

2. Lebih mahal dari orifice plate

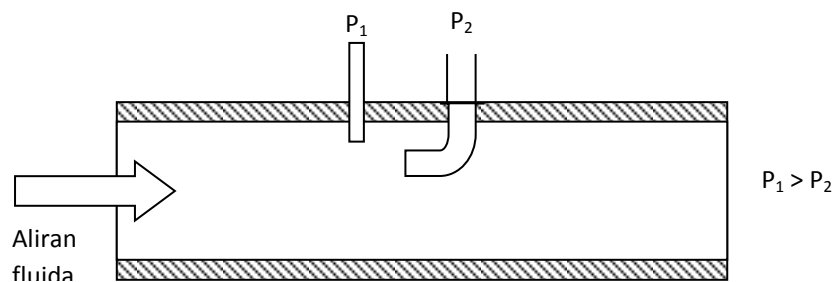
3. Beda tekanan yang ditimbulkan menjadi lebih kecil dari orifice plate.

Gambar 3.61 Pipa Venturi

d. Flow Nozzle

Tipe Flow Nozzle menggunakan sebuah corong yang diletakkan diantara sambungan pipa sensor tekanan P_1 dibagian inlet dan P_2 dibagian outlet. Tekanan P_2 lebih kecil dibandingkan P_1. Sensor jenis ini memiliki keunggulan diabnding venture dan orifice plate yaitu:

1. Masih dapat melewatkan padatan
2. Kapasitas aliran cukup besar
3. Mudah dalam pemasangan
4. Tahan terhadap gesekan fluida
5. Beda tekanan yang diperoleh lebih besar daripada pipa venturi
6. Hasil beda tekanan cukup baik karena aliran masih laminer

Gambar 3.62 Flow Nozzle

e. Pipa Pitot

Konstruksi pipa ini adalah berupa pipa biasa sedang di bagian tengah pipa diselipkan pipa kecil yang dibengkokkan ke arah inlet. Jenis pipa ini jarang dipergunakan di industri karena dengan adanya pipa kecil di bagian tengah akan menyebabkan benturan yang sangat kuat terhadap aliran fluida. Alat ini hanya dipergunakan untuk mengukur aliran fluida yang sangat lambat.

Gambar 3.63 Pipa Pitot

f. Rotameter

Rotameter terdiridari tabung vertikal dengan lubang gerak di mana kedudukan pelampung dianggap vertical sesuai dengan laju aliran melalui tabung (Gambar 3.41). Untuk laju aliran yang diketahui, pelampung tetap *stasioner* karena gaya vertical dari tekanan diferensial, gravitasi, kekentalan, dan gaya-apung akan berimbang. Jadi kemampuan menyeimbangkan diri dari pelampung yang digantung dengan kawat dan tergantung pada luas dapat ditentukan. Gaya kebawah (gravitasi dikurangi gaya apung) adalah konstan dan demikian pula gaya keatas (penurunan tekanan dikalikan luas pelampung) juga harus konstan. Dengan mengasumsikan aliran non

$$Q = \frac{C(A_t - A_f)}{\sqrt{1-[A_t - A_f)/A_t]^2}} \sqrt{2gV_t\left(\frac{W_f - W_{ff}}{A_f - W_{ff}}\right)}$$

kompresif, hasilnya adalah sebagai berikut:

atau $Q = K(A_t - A_f); C$ *dan* $[(A_t - A_f)A_t)]^2$ *jauh lebih kecil*

Di mana, Q = laju aliran volume

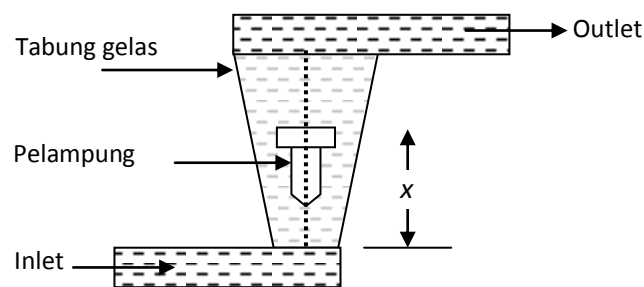
C = koefisien pengosongan

A_t = luas tabung

A_f = luas pelampung

V_f = volume pelampung

W_f = berat jenis pelampung

W_{ff} = berat jenis fluida yang mengalir

Gambar 3.64 Rotameter

Pelampung dapat dibuat dari berbagai bahan untuk mendapatkan beda kerapatan yang diperlukan (W_f-W_{ff}) untuk mengukur cairan atau gas tertentu. Tabung sering dibuat dari gelas berkekuatan tinggi sehingga dapat dilakukan pengamatan langsung terhadap kedudukan pelampung.

2.5 Mengukur Aliran Cara-cara Thermal

Cara-cara thermal biasanya dipergunakan untuk mengukur aliran udara. Pengukuran dengan menggunakan carathermal dapat dilakukan dengan cara-cara :

- Anemometer kawat panas
- Teknik perambatan panas
- Teknik penggetaran

a. Anemometer Kawat Panas

Metoda ini cukup sederhana yaitu dengan menggunakan kawat yang dipanaskan oleh aliran listrik, arus yang mengalir pada kawat dibuat tetap konstan menggunakan sumber arus konstan. Jika ada aliran udara, maka kawat akan mendingin (seperti kita meniup lilin) dengan mendinginnya kawat, maka resistansi kawat menurun. Karena dipergunakan sumber arus konstan, maka kita dapat menyensor tegangan pada ujung-ujung kawat. Sensor jenis ini memiliki sensitivitas sangat baik untuk menyensor aliran gas yang lambat. Namun sayangnya penginstalasian keseluruhan sensor tergolong sulit.

$$I^2 R_w = K_c h_c A(T_w - T_t)$$

Disini berlaku rumus :

di mana : I = arus kawat

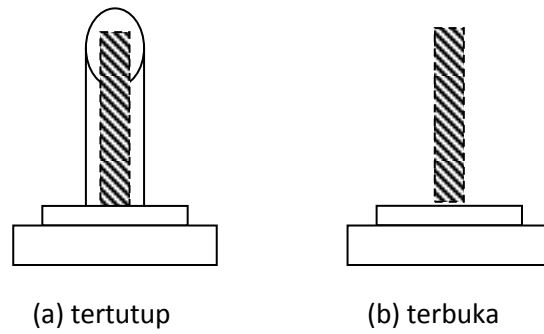
Rw = resistansi kawat

Kc = faktor konversi, panas ke daya listrik

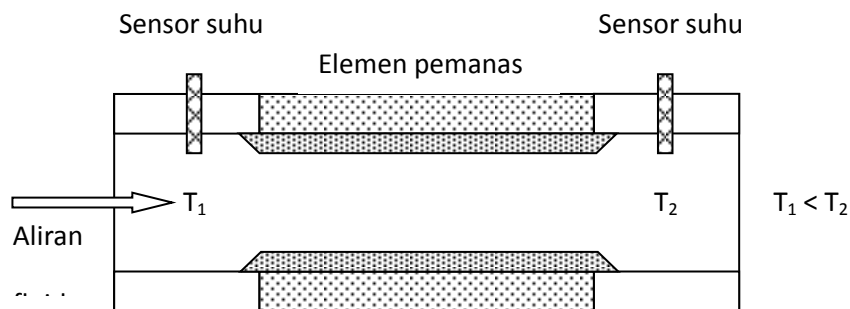
Tw = temperatur kawat

Tt = temperatur fluida yang mengalir

Hc = koefisien film (pelapis) dari perpindahan panas

A = luas perpindahan panas

Gambar 3.65 Kontruksi Anemometer Kawat Panas

b. Perambatan Panas

Pada teknik perambatan panas, pemanas dipasang pada bagian luar pipa, pipa tersebut terbuat dari bahan logam. Di kiri dan kanan pemanas, dipasang bahan isolator panas, dan pada isolator ini dipasang sensor suhu. Bila udaramengalir dari kiri ke kanan, maka suhu disebelah kiri akan terasa lebih dingin dibanding suhu sebelah kanan.

Gambar 3.66 Flowmeter Rambatan Panas

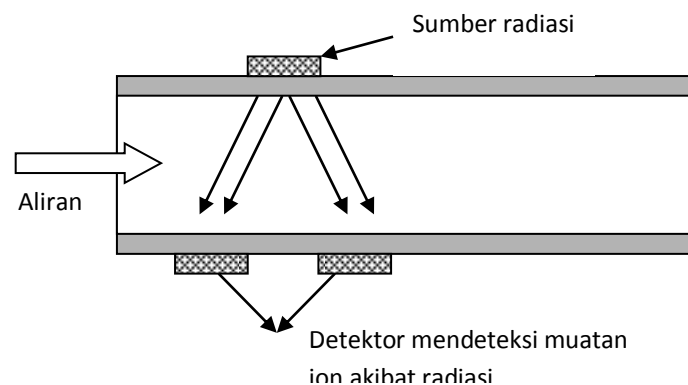
Sensor suhu yang digunakan dapat berupa sensor resistif tetapi yang biasa terpasang adalah thermokopel karena memiliki respon suhu yang cepat. Sensor aliran perambatan panas tipe lama, memanaskan seluruh bagian dari saluran udara, sehingga dibutuhkan pemanas sampai puluhan

kilowatt, untuk mengurangi daya panas tersebut digunakan tipe baru dengan membelokkan sebagian kecil udara kedalam sensor.

c. Flowmeter Radio Aktif

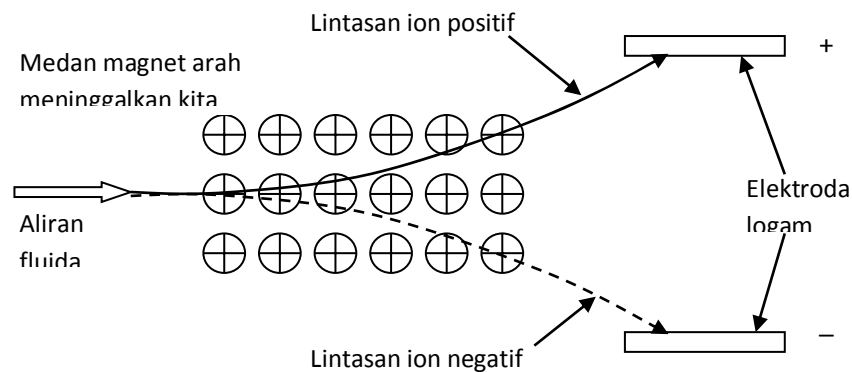
Teknik pengukuran aliran dengan radio aktif adalah dengan menembakkan partikel netron dari sebuah pemancar radio aktif. Pada jarak tertentu kea rah outlet, dipasang detector. Bila terjadi aliran, maka akan terdeteksi adanya partikel radio aktif, jumlah partikel yang terdeteksi pada selang tertentu akan sebanding dengan kecepatan aliran fluida.

Teknik lain yang masih menggunakan teknik radio aktif adalah dengan cara mencampurkan bahan radio aktif kedalam fluida kemudian pada bagian-bagian tertentu dipasang detector. Teknik ini dilakukan bila terjadi kesulitan mengukur misalnya karena bahan aliran terdiri dari zat yang berada pada berbagai fase.

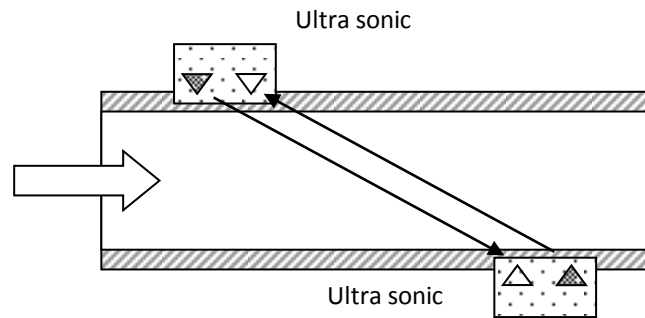
Teknik radio aktif ini juga biaa dipergunakan pada pengobatan yaitu mencari posisi pembuluh darah yang macet bagi penderita kelumpuhan.

Gambar 3.67 Flowmeter Cara Radiasi Nuklir

d. Flowmeter Elektromagnetis

Flowmeter jenis ini biasa digunakan untuk mengukur aliran cairan elektrolit. Flowmeter ini menggunakan prinsip Efek Hall, dua buah gulungan kawat tembaga dengan inti besi dipasang pada pipa agar membangkitkan medan magnetik. Dua buah elektroda dipasang pada bagian dalam pipa dengan posisi tegak lurus arus medan magnet dan tegak lurus terhadap aliran fluida.

Bila terjadi aliran fluida, maka ion-ion posistif dan ion-ino negatif membelok ke arah elektroda. Dengan demikian terjadi beda tegangan pada elektroda-elektrodanya. Untuk menghindari adanya elektrolisa terhadap larutan, dapat digunakan arus AC sebagai pembangkit medan magnet.

Gambar 3.68 Prinsip Pengukuran Aliran menggunakan Efek Hall

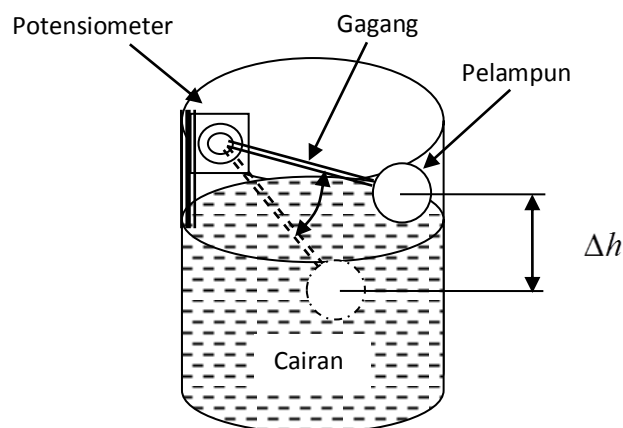
e. Flowmeter Ultrasonic

Flowmeter ini menggunakan Azas Doppler.Dua pasang ultrasonic transduser dipasang pada posisi diagonal dari pipa, keduanya dipasang dibagian tepi dari pipa, untuk menghindari kerusakan sensor dantyransmitter, permukaan sensor dihalangi oleh membran. Perbedaan lintasan terjadi karena adanya aliran fluida yang menyebabkan pwerubahan phase pada sinyal yang diterima sensor ultrasonic

Gambar 3.69 Sensor Aliran Fluida Menggunakan Ultrasonic

2.6 Sensor Level

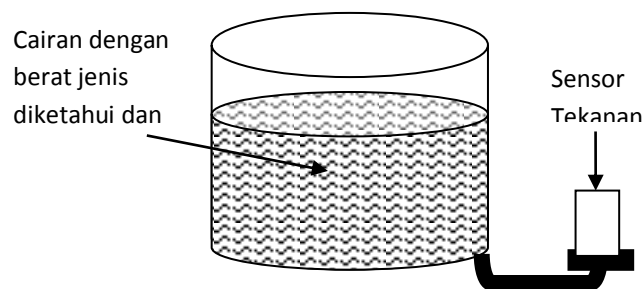
Pengukuran level dapat dilakukan dengan bermacam cara antara lain dengan pelampung atau displacer, gelombang udara, resistansi, kapasitif, ultra sonic, optic, thermal, tekanan, sensor permukaan dan radiasi. Pemilihan sensor yang tepat tergantung pada situasi dan kondisi sistem yang akan di sensor.

a. Menggunakan Pelampung

Cara yang paling sederhana dalam penyensor level cairan adalah dengan menggunakan pelampung yang diberi gagang. Pembacaan dapat dilakukan dengan memasang sensor posisi misalnya **potensiometer** pada bagian engsel gagang pelampung. Cara ini cukup baik diterapkan untuk tanki-tanki air yang tidak terlalu tinggi.

Gambar 3.70 Sensor Level Menggunakan Pelampung

b. Menggunakan Tekanan

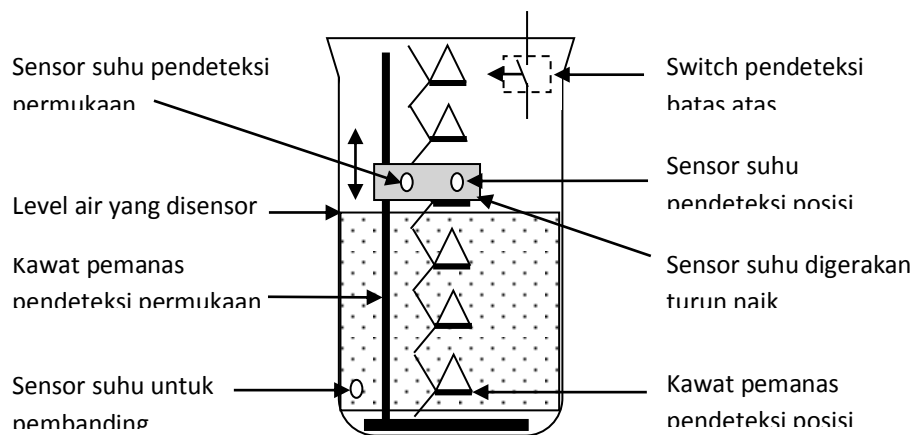
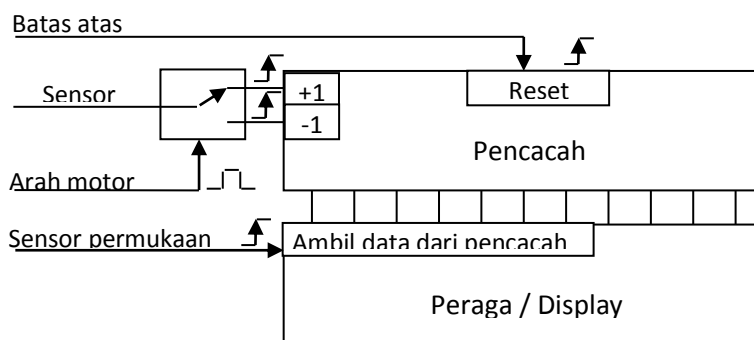
Untuk mengukur level cairan dapat pula dilakukan menggunakan sensor tekanan yang dipasang di bagian dasar dari tabung. Cara ini cukup praktis, akan tetapi ketelitiannya sangat tergantung dari berat jenis dan suhu cairan sehingga kemungkinan kesalahan pembacaan cukup besar.

Sedikit modifikasi dari cara diatas adalah dengan cara mencelupkan pipa berisi udara kedalam cairan. Tekanan udara didalam tabung diukur menggunakan sensor tekanan, cara ini memanfaatkan hukum Pascal. Kesalahan akibat perubahan berat jenis cairan dan suhu tetap tidak dapat diatasi.

Gambar 3.71 Sensor Level Menggunakan Sensor Tekanan

c. Menggunakan Cara Thermal

Teknik ini didasarkan pada fakta penyerapan kalor oleh cairan lebih tinggi dibandingkan penyerapan kalor oleh uapnya, sehingga bagian yang tercelup akan lebih dingin dibandingkan bagian yang tidak tercelup. Kontruksi dasar sensor adalah terdidiri dari sebuah elemen pemanas dibentuk berliku-liku dan sebuah pemanas lain dibentuk tetap lurus. Dua buah sensor diletakkan berhadapan dengan bagian tegakdari pemanas, sebuah sensor tambahan harus diletakkan selalu berada dalam cairan yang berfungsi untuk pembanding. Kedua sensor yang berhadapan dengan pemanas digerakkan oleh sebuah aktuator secara perlahan-lahan dengan perintah naik atau turun secara bertahap. Mula-mula sensor diletakkan pada bagian paling atas, selanjutnya sensor suhu digerakkan ke bawah perlahan-

lahan, setiap terdeteksi adanya perubahan suhu pada sensor yang berhadapan pada pemanas berliku, maka dilakukan penambahan pencacahan terhadap pencacah elektronik. Pada saat sensor yang berhadapan dengan pemanas lurus mendeteksi adanya perubahan dari panas ke dingin, maka hasil pencacahan ditampilkan pada peraga.

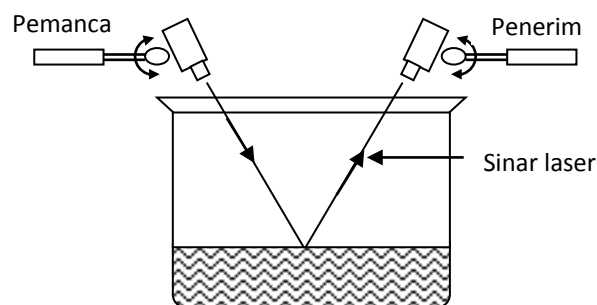
Sensor level cairan dengan cara thermal ini biasanya digunakan pada tanki-tanki boiler, karena selain sebagai sensor level cairan, juga dapat dipergunakan untuk mendeteksi gradien perubahan suhu dalam cairan.

Gambar 3.72 Teknik Penyensoran Level Cairan Cara Thermal

Gambar 3.73 Blok Diagram Pengolahan dan Pendisplayan Sensor Level Menggunakan Cara Thermal

d. Menggunakan Cara Optik

Pengukuran level menggunakan optic didasarkan atas sifat pantulanpermukaan atau pembiasan sinar dari cairan yang disensor. Ada beberapa carayang dapat digunakan untuk penyensoran menggunakan optic yaitu:

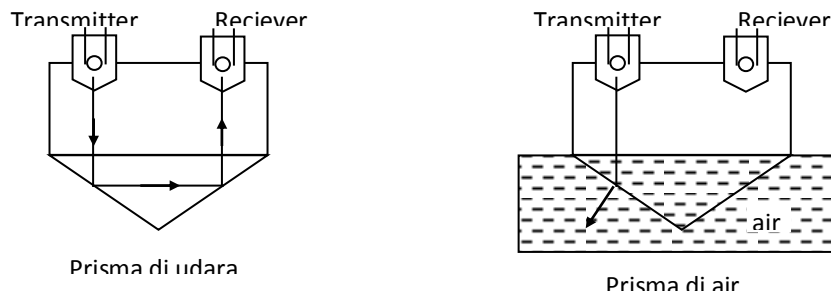
1. Menggunakan sinar laser
2. Menggunakan prisma
3. Menggunakan fiber optik

e. Menggunakan Sinar Laser

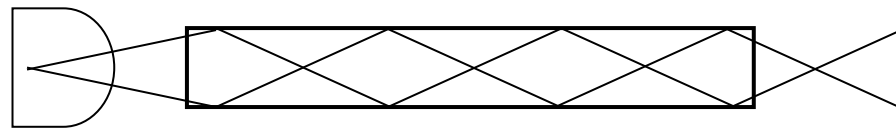
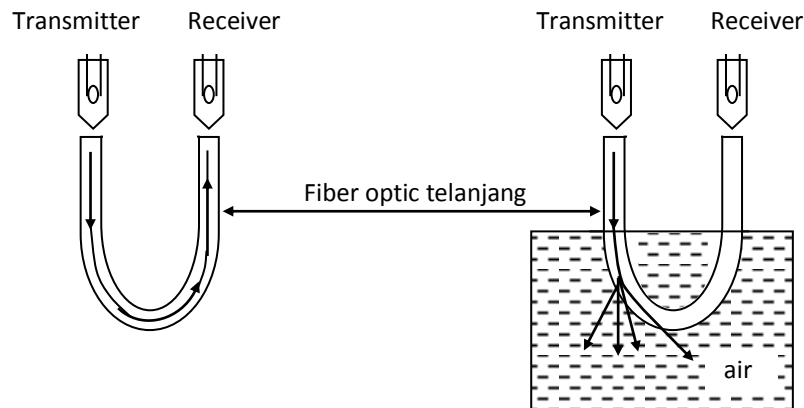
Sinar laser dari sebuah sumber sinar diarahkan ke permukaan cairan, kemudian pantulannya dideteksi menggunakan detector sinar laser. Posisi pemancar dan detector sinar laser harus berada pada bidang yang sama. Detektor dan umber sinar laser diputar. Detektor diarahkan agar selalu berada pada posisi menerima sinar. Jika sinar yang datang diterima oleh detektor, maka level permukaan cairan dapat diketahui dngan menghitung posisi-posisi sudut dari sudut detektor dan sudut pemancar.

Gambar 3.74 Sensor Level menggunakan Sinar Laser

f. Menggunakan Prisma

Teknik ini memanfaatkan harga yang berdekatan antara index bias air dengan index bias gelas. Sifat pantulan dari permukaan prisma akan menurun bila prisma dicelupkan kedalam air. Prisma yang digunakan adalah prisma bersudut 45 dan 90 derajat. Sinar diarahkan ke prisma, bila prisma

ditempatkan di udara, sinar akan dipantulkan kembali setelah melewati permukaan bawah prisma. Jika prisma ditempatkan di air, maka sinar yang dikirim tidak dipantulkan akan tetapi dibiaskan oleh air, Dengan demikian prisma ini dapat digunakan sebagai pengganti pelampung. Keuntungan yang diperoleh ialah dapat mereduksi ukuran sensor.

Gambar 3.75 Sensor Level menggunakan Prisma

g. Menggunakan Fiber Optik

Teknik ini tidak jauh berbeda dengan teknik penyensoran permukaan air menggunakan prisma, yaitu menggunakan prinsip pemantulan dan pembiasan sinar. Jika fiber optic diletakan di udara, sinar yang dimasukan ke fiber optic dipantulkan oleh dinding fiber optic, sedangkan bila fiber optic telanjang dimasukan ke air, maka dinding fiber optic tidak lagi memantulkan sinar

Gambar 3.76 Sensor Level menggunakan Serat Optik

Contoh Soal:

1. Sebutkan beberapa macam sensor mekanik yang anda ketahui
2. Jelaskan cara kerja straingauge yang digunakan sebagai sensor posisi
3. Ada berapa macam tachogenerator yang dapat digunakan sebagai sensor kecepatan
4. Sebutkan beberapa jenis sensor tekanan yang anda ketahui
5. Pipa venturi dapat digunakan sebagai sensor aliran bagaimana caranya
6. Ada berapa cara dapat dilakukan untuk penyensoran level cairan.

Jawab:

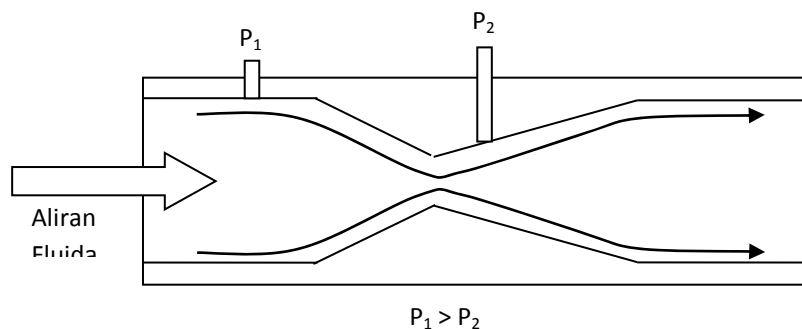
1. Sensor mekanik antara lain: sensor posisi, sensor kecepatan, sensor tekanan, sensor aliran dan sensor level

2. Straingauge adalah sensor posisi yang terbuat dari elemen kawat tahanan. Bekerja berdasarkan perubahan panjang dari kawat tahanan akibat tekanan atau regangan. Perubahan panjang menyebakan perubahan nilai tahanan yang dimanfaatkan sebagai sensor.

3. Tachogenerator berfungsi sebagai sensor kecepatan ada 3 macam yaitu: tg DC, tg AC dan tg AC bergerigi

4. Sensor tekanan adalah: 1] Transduser Tekanan silicon, 2] Sensor Tekanan Tipe Bourdon dan Bellow dan 3] Load cell

5. Cara kerja pipa venturi sebagai sensor aliran berdasarkan perbedaan tekanan P_1 dan P_2 yang dipasang pada pipa.

$P_1 > P_2$

6. Ada 4 cara yaitu : menggunakan pelampung, tekanan, thermal dan optik

Kegiatan :

- Diskusi kelompok yaitu merancang sistem kendali dengan memanfaatkan sensor posisi, sensor thermal, sensor mekanik dan sensor aliran fluida. Buat laporkan hasil diskusi kelompok masing-masing.

2.7 Sensor Cahaya

Elemen-elemen sensitive cahaya merupakan alat terandalkan untuk mendeteksi energi cahaya. Alat ini melebihi sensitivitas mata manusia terhadap semua spectrum warna dan juga bekerja dalam daerah-daerah ultraviolet dan infra merah.

Energi cahaya bila diolah dengan cara yang tepat akan dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk teknik pengukuran, teknik pengontrolan dan teknik kompensasi.

Penggunaan praktis alat sensitif cahaya ditemukan dalam berbagai pemakaian teknik seperti halnya :

- Tabung cahaya atau fototabung vakum (*vaccum type phototubes*), paling menguntungkan digunakan dalam pemakaian yang memerlukan pengamatan pulsa cahaya yang waktunya singkat, atau cahaya yang dimodulasi pada frekuensi yang relative tinggi.
- Tabung cahaya gas (*gas type phototubes*), digunakan dalam industri gambar hidup sebagai pengindra suara pada film.
- Tabung cahaya pengali atau pemfotodarap (*multiplier phottubes*), dengan kemampuan penguatan yang sangat tinggi, sangat banyak digunakan pada pengukuran fotoelektrik dan alat-alat kontrol dan juga sebagai alat cacah kelipan (*scientillation counter*).
- Sel-sel fotokonduktif (*photoconductive cell*), juga disebut tahanan cahaya (*photo resistor*) atau tahanan yang bergantung cahaya (*LDR-light dependent resistor*), dipakai luas dalam industri dan penerapan pengontrloan di laboratorium.
- Sel-sel foto tegangan (*photovoltatic cells*), adalah alat semikonduktor untuk mengubah energi radiasi daya listrik. Contoh yang sangat baik adalah sel matahari (*solar cell*) yang digunakan dalam teknik ruang angkasa.

a. Divais Elektrooptis

Cahaya merupakan gelombang elektromagnetis (EM) yang memiliki spectrum warna yang berbeda satu sama lain. Setiap warna dalam spectrum mempunyai energi, frekuensi dan panjang gelombang yang berbeda. Hubungan spektrum optis dan energi dapat dilihat pada formula dan gambar berikut.

Energi photon (Ep) setiap warna dalam spektrum cahaya nilainya adalah:

$$Wp = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Dimana :

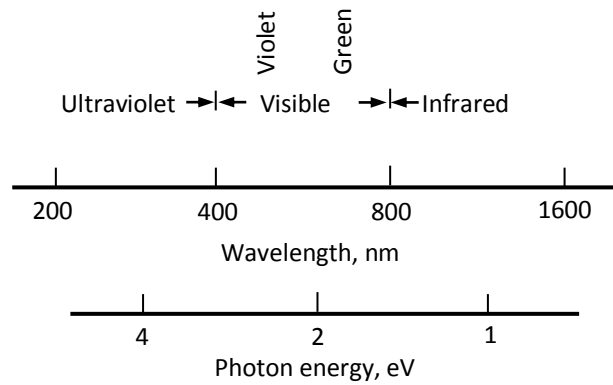
Wp = energi photon (eV)

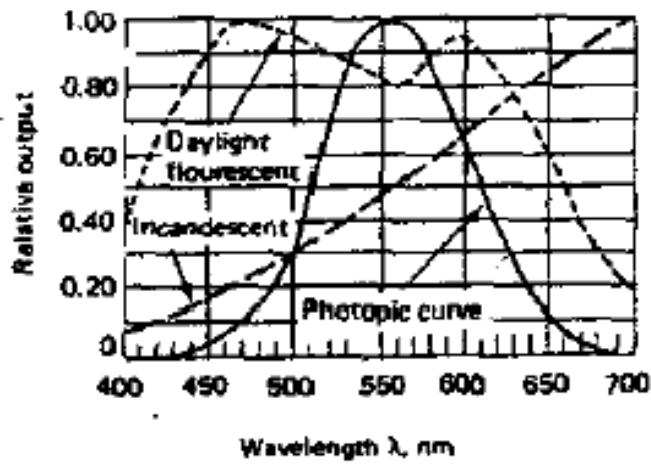
h = konstanta Planck's (6,63 x 10^{-34} J-s)

c = kecepatan cahaya, Electro Magnetic (2,998 x 10^{8} m/s)

λ = panjang gelombang (m)

f = frekuensi (Hz)

Frekuensi foton bergantung pada energi yang dilepas atau diterima saat elektron berpindah tingkat energinya. Spektrum gelombang optis diperlihatkan pada gambar berikut, spektrum warna cahaya terdiri dari *ultra violet* dengan panjang gelombang 200 sampai 400 nanometer (*n*m), visible adalah spektrum warna cahaya yang dapat dilihat oleh mata dengan panjang gelombang 400 sampai 800 nm yaitu warna violet, hijau dan merah, sedangkan spektrum warna *infrared* mulai dari 800 sampai 1600 nm adalah warna cahaya dengan frekuensi terpendek.

Gambar 3.77 Spektrum Gelombang EM

Densitas daya spektral cahaya adalah:

Gambar 3.78 Kurva Output Sinyal Optis

Sumber-sumber energi photon:

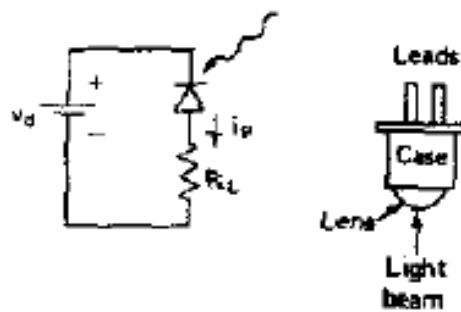
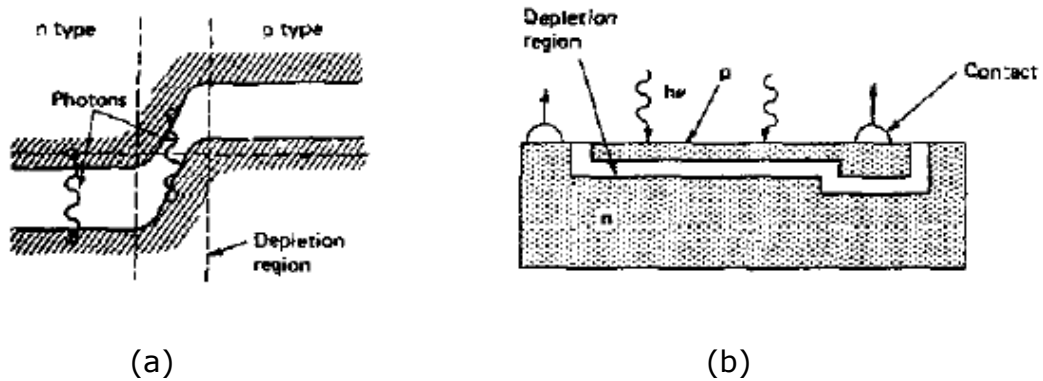
Bahan-bahan yang dapat dijadikan sumber energi selain mata hari adalah antara lain:

- Incandescent Lamp yaitu lampu yang menghasilkan energi cahaya dari pijaran filament bertekanan tinggi, misalnya lampu mobil, lampu spot light, lampu flashlight.
- Energi Atom, yaitu memanfaatkan loncatan atom dari valensi energi 1 ke level energi berikutnya.
- Fluorescense, yaitu sumber cahaya yang berasal dari perpendaran bahan fluorescence yang terkena cahaya tajam. Seperti Layar Osciloskop
- Sinar LASER adalah sumber energi mutakhir yang dimanfaatkan untuk sebagai cahaya dengan kelebihannya antara lain : *monochromatic* (cahaya tunggal atau membentuk garis lurus)*, coherent* (cahaya seragam dari sumber sampai ke beban sama)*, dan divergence* (simpangan sangat kecil yaitu 0,001 radians).

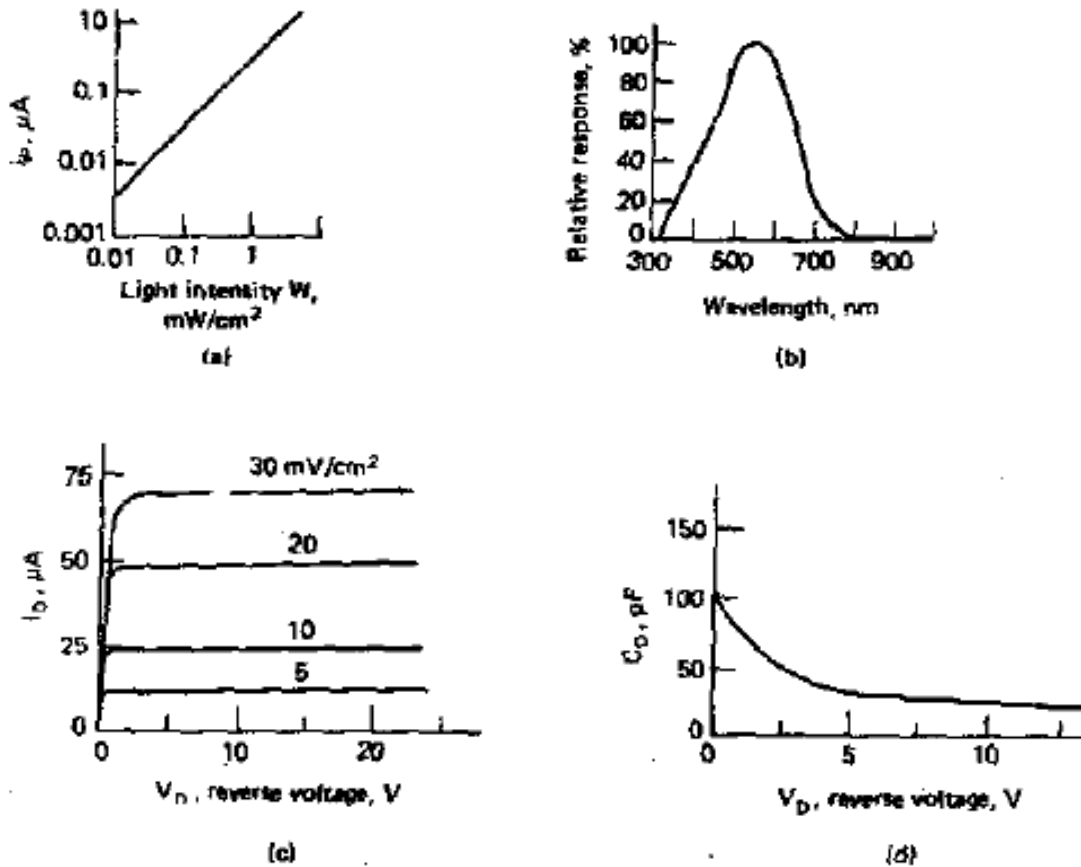
b. Photo Semikonduktor

Divais photo semikonduktor memanfaatkan efek kuantum pada *junction*, energi yang diterima oleh elektron yang memungkinkan elektron pindah dari ban valensi ke ban konduksi pada kondisi bias mundur.

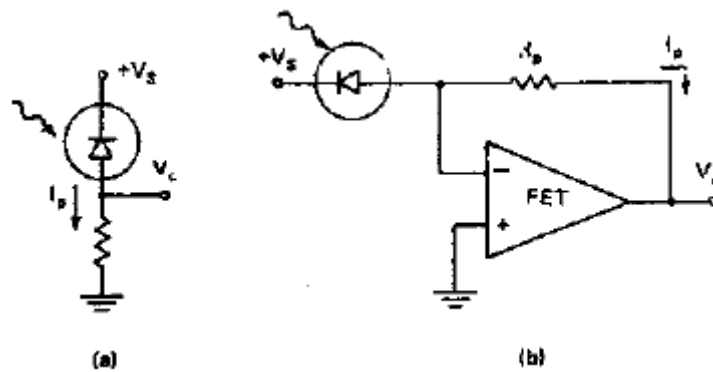
Bahan semikonduktor seperti Germanium (Ge) dan Silikon (Si) mempunyai 4 buah electron valensi, masing-masing electron dalam atom saling terikat sehingga electron valensi genap menjadi 8 untuk setiap atom, itulah sebabnya kristal silicon memiliki konduktivitas listrik yang rendah, karena setiap electron terikan oleh atom-atom yang berada disekelilingnya. Untuk membentuk semikonduktor tipe P pada bahan tersebut disisipkan pengotor dari unsure golongan III, sehingga bahan tersebut menjadi lebih bermuatan positif, karena terjadi kekosongan electron pada struktur kristalnya.

Bila semikonduktor jenis N disinari cahaya, maka elektron yang tidak terikat pada struktur kristal akan mudah lepas. Kemudian bila dihubungkan semikonduktor jenis P dan jenis N dan kemudian disinari cahaya, maka akan terjadi beda tegangan diantara kedua bahan tersebut. Beda potensial pada bahan ilikon umumnya berkisar antara 0,6 volt sampai 0,8 volt.

Gambar 3.79 Konstruksi Dioda Foto (a) junction harus dekat permukaan (b) lensa untuk memfokuskan cahaya (c) rangkaian dioda foto

Ada beberapa karakteristik dioda foto yang perlu diketahui antara lain:

- Arus bergantung linier pada intensitas cahaya
- Respons frekuensi bergantung pada bahan (Si 900nm, GaAs 1500nm, Ge 2000nm)
- Digunakan sebagai sumber arus
- *Junction capacitance* turun menurut tegangan bias mundurnya
- Junction capacitance menentukan respons frekuensi arus yang diperoleh

Gambar 3.80 Karakteristik Dioda Foto (a) intensitas cahaya (b) panjang gelombang (c) reverse voltage vs arus dan (d) reverse voltage vs kapasitansi

- **Rangkaian pengubah arus ke tegangan**

Untuk mendapatkan perubahan arus ke tegangan yang dapat dimanfaatkan maka dapat dibuat gambar rangkaian seperti berikut yaitu dengan memasangkan resistor dan op-amp jenis *field effect transistor.*

Gambar 3.81 Rangkaian pengubah arus ke tegangan

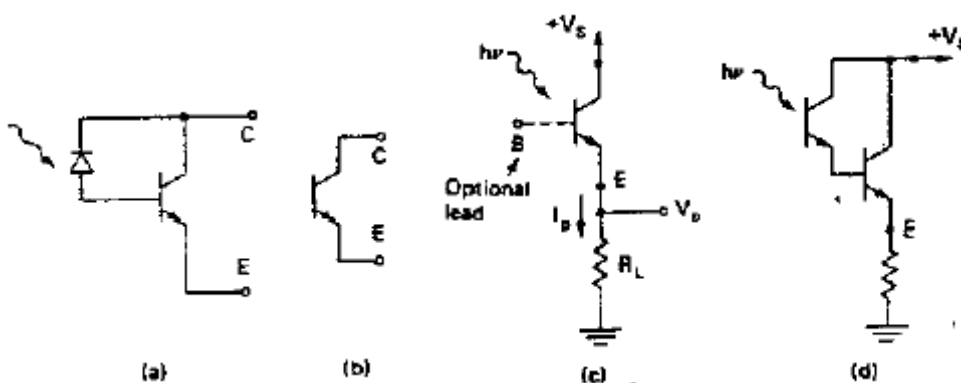
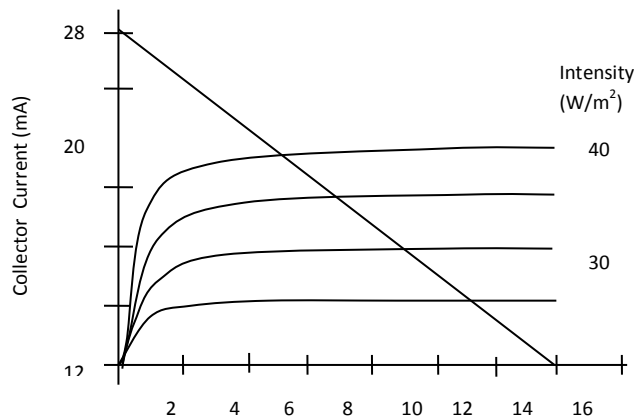
c. Photo Transistor

Sama halnya dioda foto, maka transistor foto juga dapat dibuat sebagai sensor cahaya. Teknis yang baik adalah dengan menggabungkan dioda foto dengan transistor foto dalam satu rangkain.

– Karakteristik transistor foto yaitu hubungan arus, tegangan dan intensitas foto

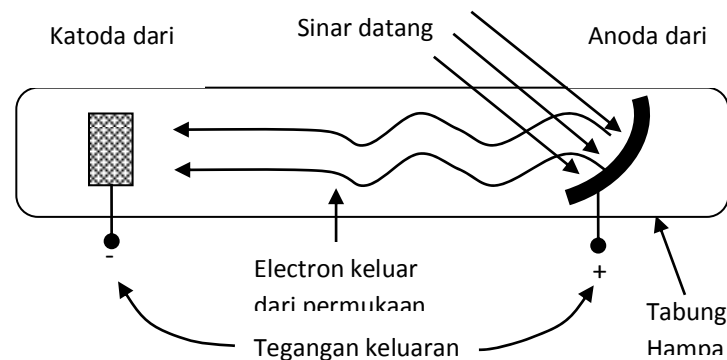
– Kombinasi dioda foto dan transistor dalam satu chip

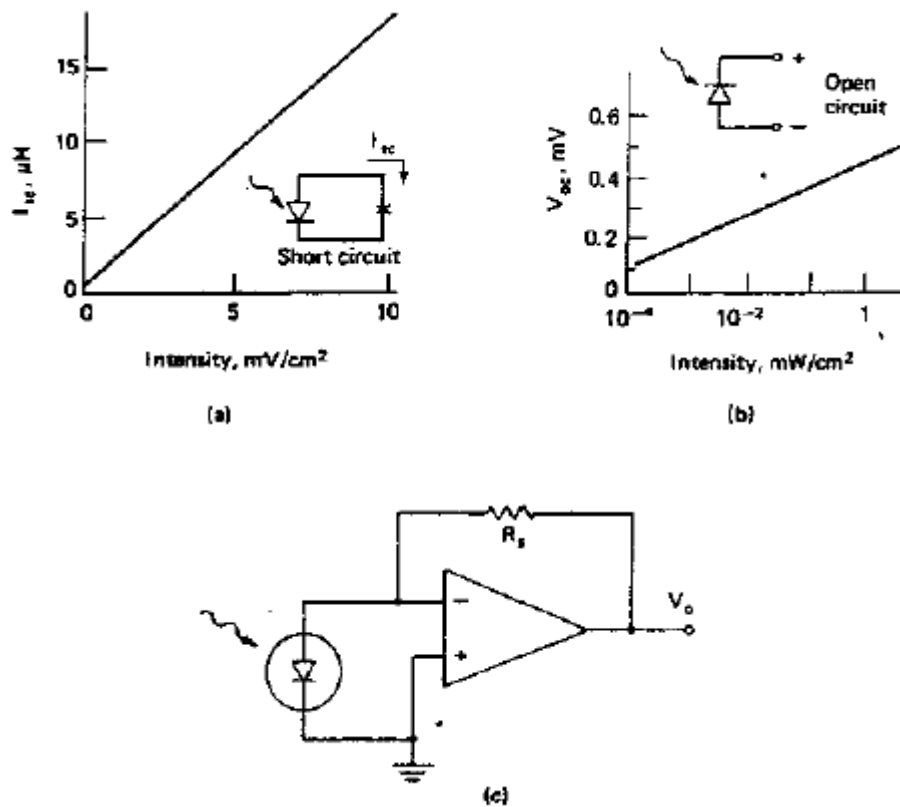
– Transistor sebagai penguat arus

– Linieritas dan respons frekuensi tidak sebaik dioda foto

Gambar 3.82 Karakteristik transistor foto, (a) sampai (d) rangkaian uji transistor foto

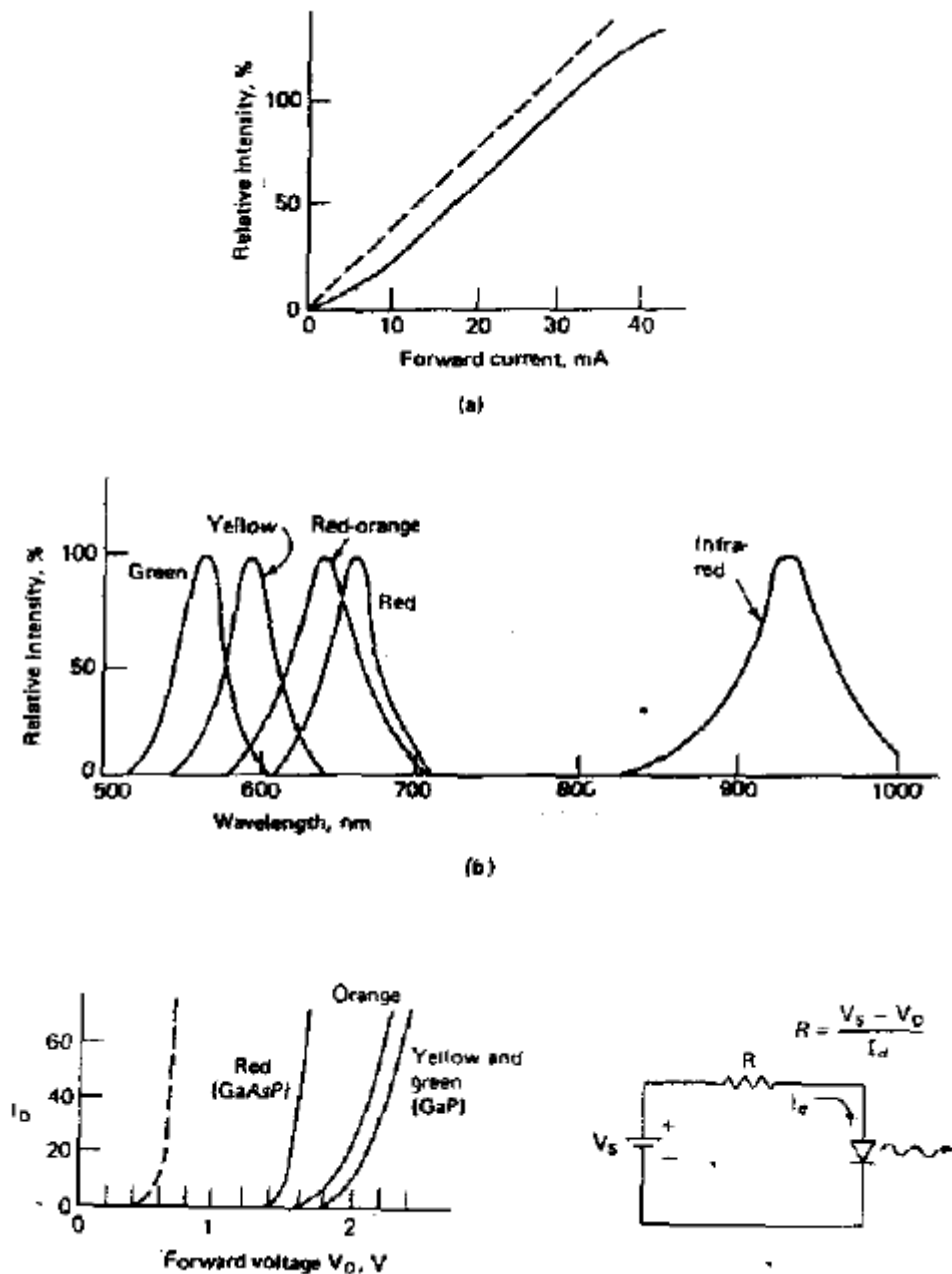
d. Sel Photovoltaik

Efek sel photovoltaik terjadi akibat lepasnya elektron yang disebabkan adanya cahaya yang mengenai logam. Logam-logam yang tergolong golongan 1 pada sistem periodik unsur-unsur seperti Lithium, Natrium, Kalium, dan Cessium sangat mudah melepaskan elektron valensinya. Selain karena reaksi redoks, elektron valensilogam-logam tersebut juga mudah lepas olehadanya cahaya yang mengenai permukaan logam tersebut. Diantara logam-logam diatas Cessium adalah logam yang paling mudah melepaskan elektronnya, sehingga lazim digunakan sebagai foto detektor.

Tegangan yang dihasilan oleh sensor foto voltaik adalah sebanding dengan frekuensi gelombang cahaya (sesuai konstanta Plank E = h.f). Semakin kearah warna cahaya biru, makin tinggi tegangan yang dihasilkan. Tingginya intensitas listrik akan berpengaruh terhadap arus listrik. Bila foto voltaik diberi beban maka arus listrik dapat dihasilkan adalah tergantung dari intensitas cahaya yang mengenai permukaan semikonduktor.

Gambar 3.83 Pembangkitan tegangan pada Foto volatik

Berikut karakteristik dari foto voltaik berdasarkan hubungan antara intensitas cahaya dengan arus dan tegangan yang dihasilkan.

Gambar 3.84 (a) & (b) Karakteristik Intensitas vs Arus dan Tegangan dan (c) Rangakain penguat tegangan.

e. Light Emitting Diode (LED)

- Prinsip kerja kebalikan dari dioda foto
- Warna (panjang gelombang) ditentukan oleh band-gap
- Intensitas cahaya hasil berbanding lurus dengan arus
- Non linieritas tampak pada arus rendah dan tinggi
- Pemanasan sendiri (*self heating*) menurunkan efisiensi pada arus tinggi

Gambar 3.85 Karakteristik LED

- **Karakteristik Arus Tegangan**

  – Mirip dengan dioda biasa

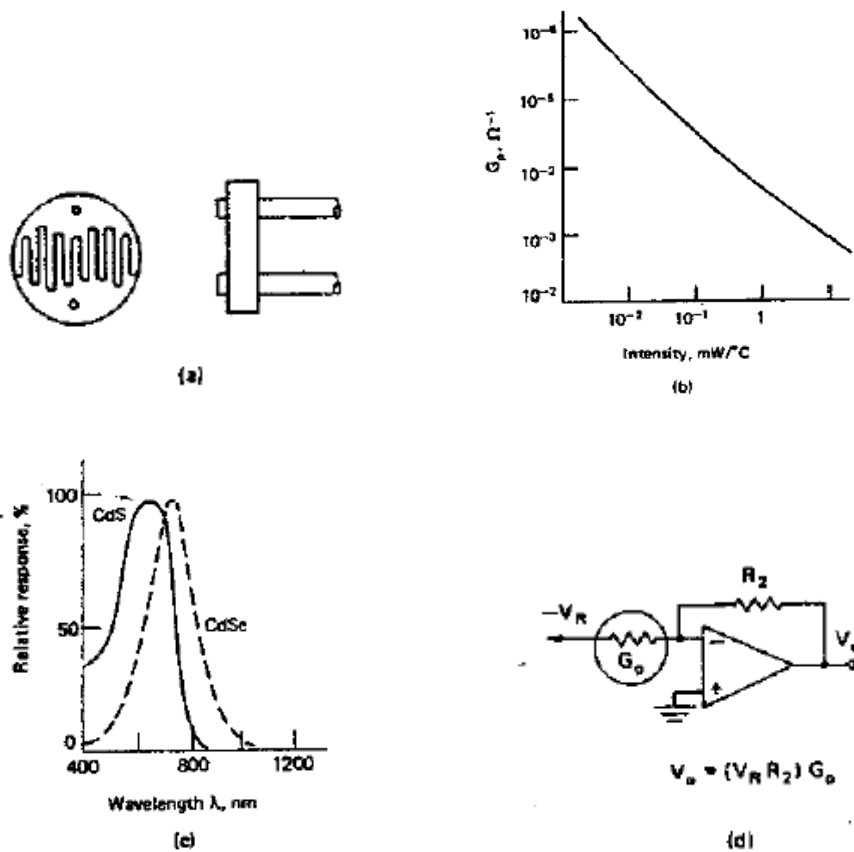
  – Cahaya biru nampak pada tegangan 1,4 – 2,7 volt

  – Tegangan *threshold* dan energi foton naik menurut energi band-gap

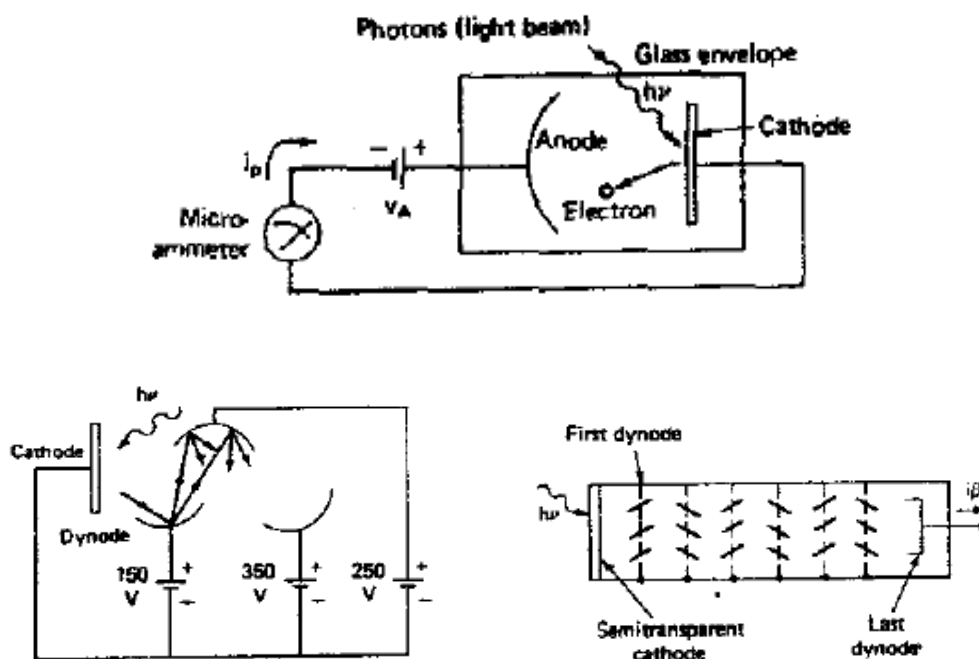
  – Junction mengalami kerusakan pada tegangan 3 volt

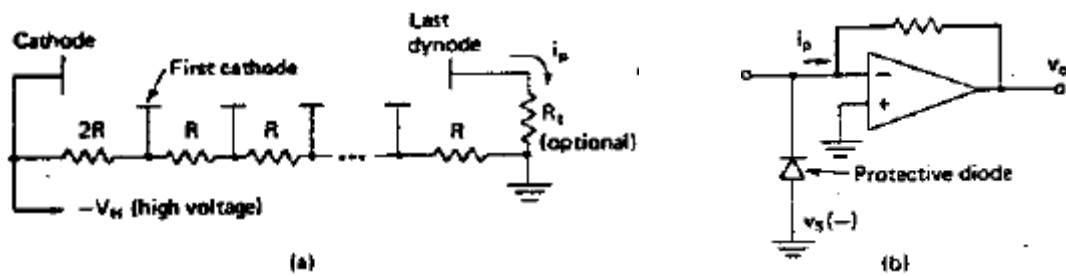
  – Gunakan resistor seri untuk membatasi arus/tegangan

f. Photosel

- Konduktansi sebagai fungsi intensitas cahaya masuk
- Resistansi berkisar dari 10MW (gelap) hingga 10W (terang)
- Waktu respons lambat hingga 10ms
- Sensitivitas dan stabilitas tidak sebaik dioda foto
- Untuk ukuran besar lebih murah dari sel fotovoltaik
- Digunakan karena biaya murah

Gambar 3.86 Konstruksi dan Karakteristik Fotosel

g. Photomultiplier

- Memanfaatkan efek fotoelektrik
- Foton dengan nergi lebih tinggi dari *workfunction* melepaskan elektron dari permukaan katoda
- Elektron dikumpulkan (dipercepat) oleh anoda dengan tegangan (tinggi)
- Multiplikasi arus (elektron) diperoleh dengan dynode bertingkat
- Katoda dibuat dari bahan semi transparan

Gambar 3.87 Konstruksi Photomultiplier

- **Rangkaian untuk Photomultiplier**
  - Perbedaan tegangan (tinggi) tegangan katoda (negatif) dan dynode(positif)
  - Beban resistor terhubung pada dynoda
  - Common (ground) dihubungkan dengan terminal tegangan positif catu daya
  - Rangkaian koverter arus-tegangan dapat digunakan
  - Dioda ditempatkan sebagai *surge protection*

Gambar 3.88 Rangkaian Ekivalen dan uji Photomultiplier

• Pemanfaatan

– Sangat sensitif, dapat digunakan sebagai penghitung pulsa

– Pada beban resistansi rendah 50-1000 W, lebar pulsa tipikal 5-50 ns

– Gunakan peak detektor untuk mengukur tingat energi

• Kerugian

– Mudah rusak bila terekspos pada cahaya berlebih (terlalu sensitif)

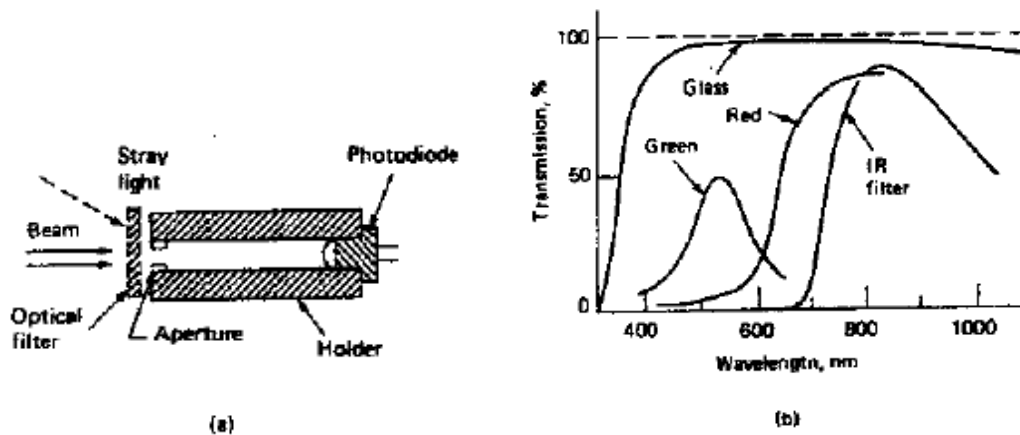
– Perlu catu tegangan tinggi

– Mahal

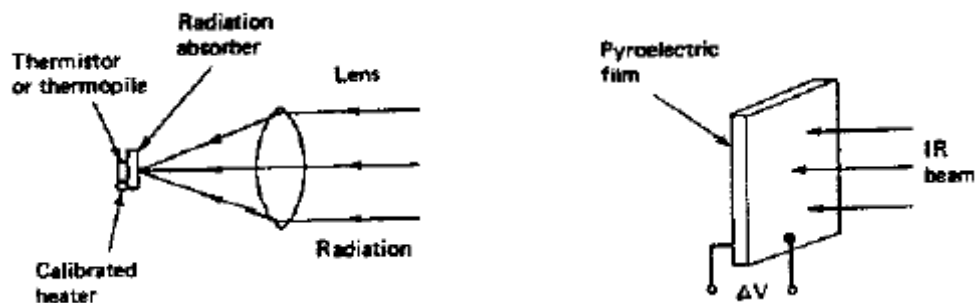
h. Lensa Dioda Photo

– Lensa dimanfaatkan untuk memfokuskan atau menyebarkan cahaya

– Lensa detektor cahaya sebaiknya ditempatkan dalam selonsong dengan filter sehingga hanya menerima cahaya pada satu arah dan panjang gelombang tertentu saja (misal menghindari cahaya lampu TL dan sinar matahari)

– Gunakan modulasi bila interferensi tinggi dan tidak diperlukan sensitivitas tinggi

Gambar 3.89 Kontruksi dan karakteristik lensa dioda foto

i. Pyrometer Optis dan Detektor Radiasi Thermal

- Salah satu sensor radiasi elektro magnetik: flowmeter
- Radiasi dikumpulkan dengan lensa untuk diserap pada bahan penyerap radiasi
- Energi yang terserap menyebabkan pemanasan pada bahan yang kemudian diukur temperaturnya menggunakan thermistor, termokopel dsb
- Sensitivitas dan respons waktu buruk, akurasi baik karena mudah dikalibrasi (dengan pembanding panas standar dari resistor)
- Lensa dapat digantikan dengan cermin

Gambar 3.90 Instalasi Pyrolektrik

– Detektor sejenis: film pyroelektrik

– Dari bahan sejenis piezoelektrik yang menghasilkan tegangan akibat pemanasan

– Hanya ber-respons pada perubahan bukan DC

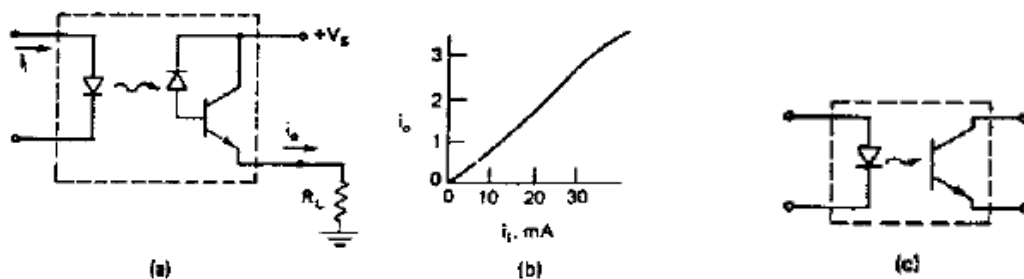
– Pirometer optik dapat diguanakanuntuk mengukur atau mendeteksi *totalradiation* dan *monochromatic radiation.*

j. Isolasi Optis dan Transmiter-Receiver serat optik

– Cahaya dari LED dan diterima oleh dioda foto digunakan sebagai pembawa informasi menggantikan arus listrik

– Keuntungan: isolasi listrik antara dua rangkaian (tegangan tembus hingga 3kV)

– Dimanfaatkan untuk *safety* dan pada rangkaian berbeda ground

– Hubungan input-output cukup linier, respons frekuensi hingga di atas 1 MHz

Gambar 3.91 Kontruksi dan karakteristik lensa dioda foto

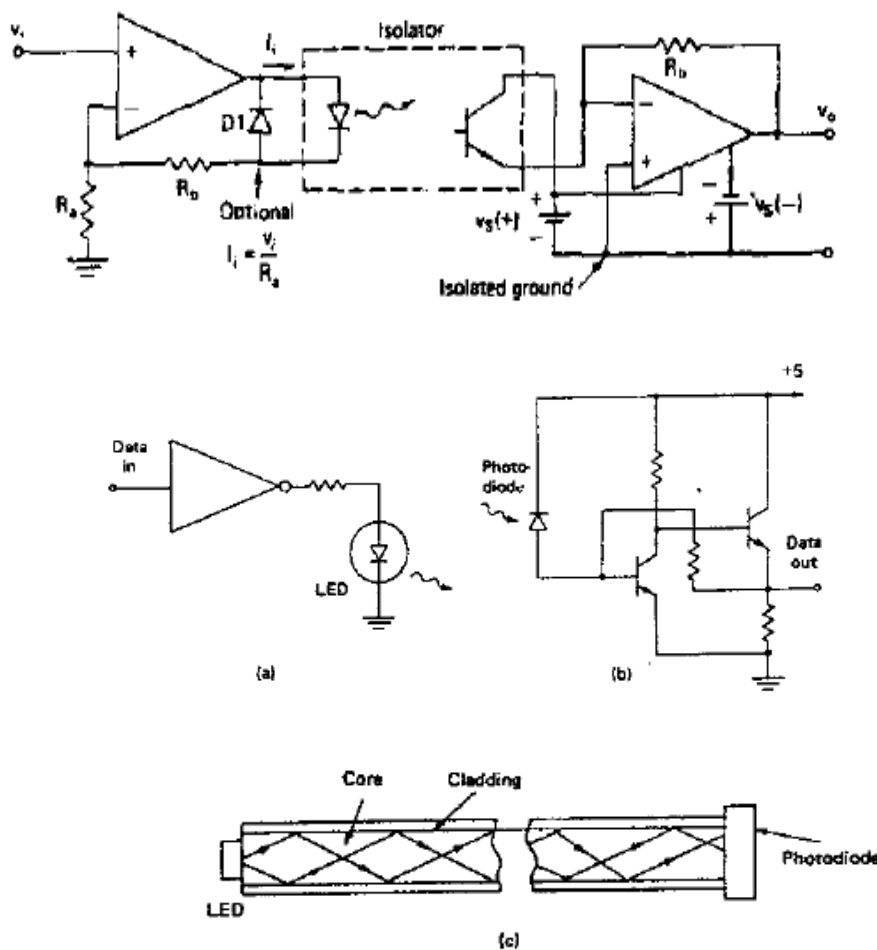
• Rangkaian untuk isolasi elektrik

– Driver: konverter tegangan ke arus, receiver: konverter arus ke tegangan

– Hanya sinyal positif yang ditransmisikan

– Dioda dan resistor digunakan untuk membatasi arus

– Penguatan keseluruhan bergantung temperatur (tidak ada umpan balik)

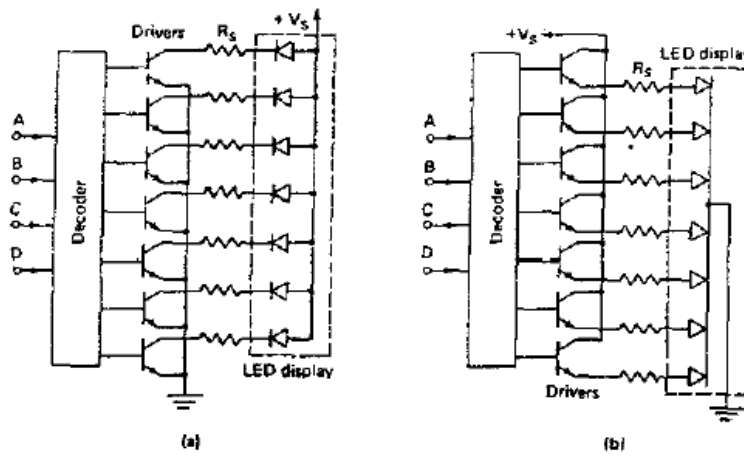
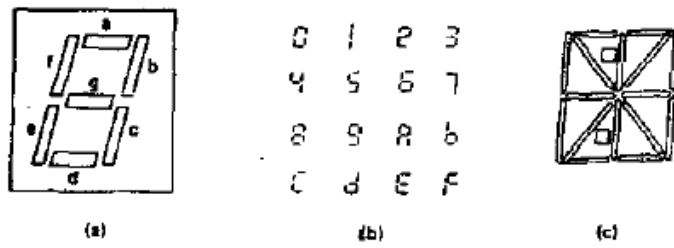
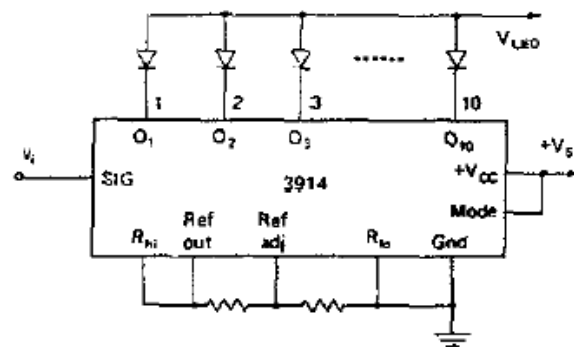
– Untuk komunikasi dengan serat optik media antara LED dan dioda foto dihubungan dengan serat optik

Gambar 3.92 Rangkaian isolasi elektrik menggunakan serat optik

k. Display Digital dengan LED

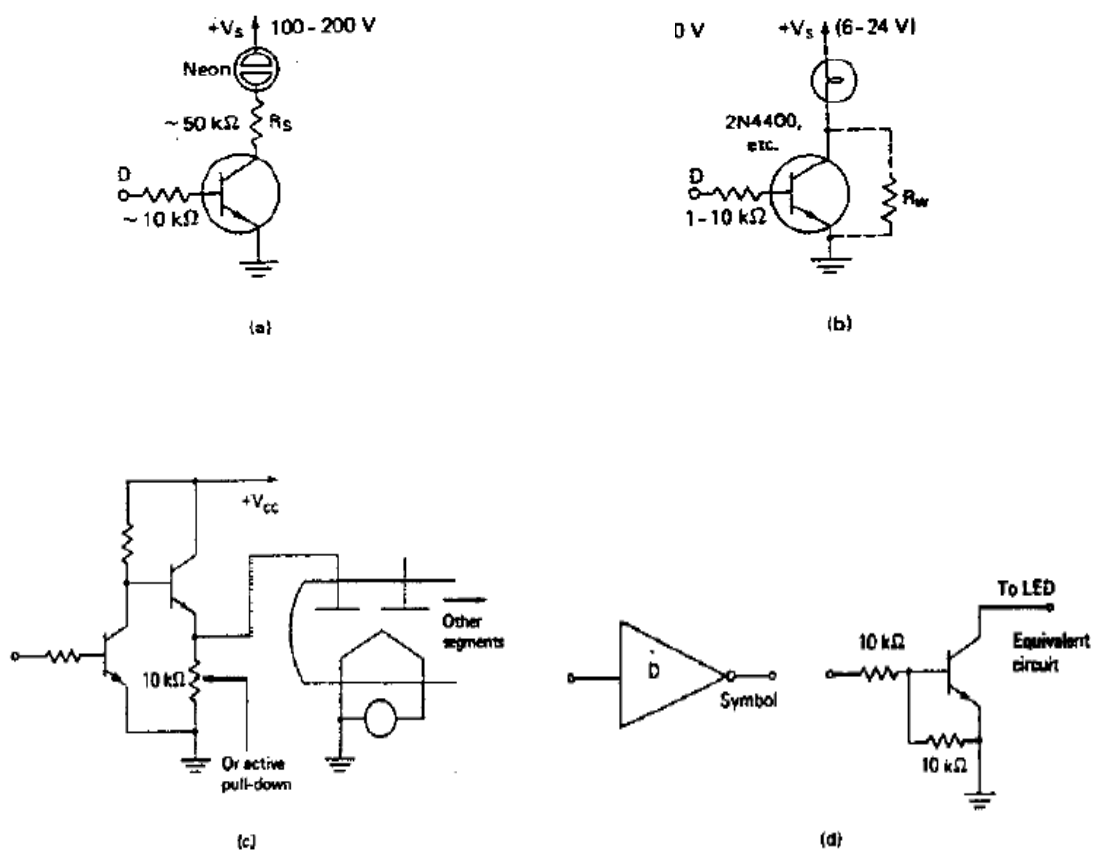
– Paling umum berupa peraga 7 segmen dan peraga heksadesimal , masing-masing segmen dibuat dari LED

– Hubungan antar segmen tersedai dalam anoda atau katoda bersama (common anode atau common cathode)

– Resistor digunakan sebagai pembatas arus 100-470 W

– Tersedia pula dengan dekoder terintegrasi

Gambar 3.93 Seven segment dan rangkaian uji

Gambar 3.94 LED bar display pengganti VU meter pada amplifier

- **Peraga Arus dan Tegangan Tinggi**

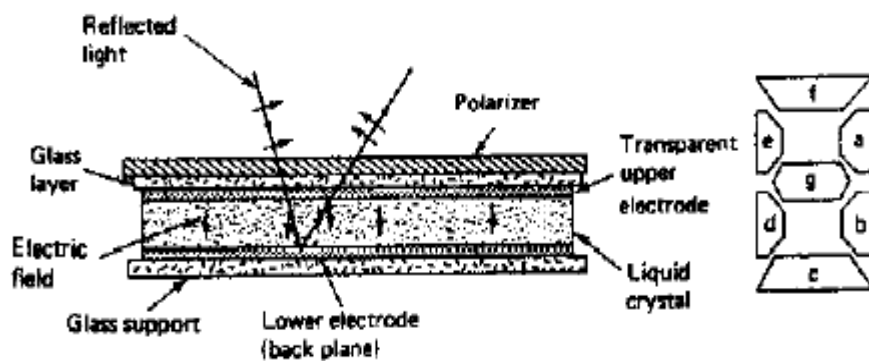
  - Peraga 7 segmen berupa gas discharge, neon atau lampu pijar
  - Cara penggunaan mirip dengan peraga 7 segmen LED tetapi tegangan yang digunakan tinggi
  - Untuk neon dan lampu pijar dapat digunakan transistor dan resistor untuk membatasi arusnya
  - Untuk lampu pijar arus kecil diberikan pada saat off untuk mengurangi daya penyalaan yang tinggi
  - Vacuum fluorecent display (VFD) menggunakan tegangan 15-35 volt di atas tegangan filament
  - Untuk LED dengan arus tinggi dapat digunakan driver *open collector* yang umunya berupa *current sink*

Gambar 3.95 Seven segment neon menggunakan tegangan tinggi

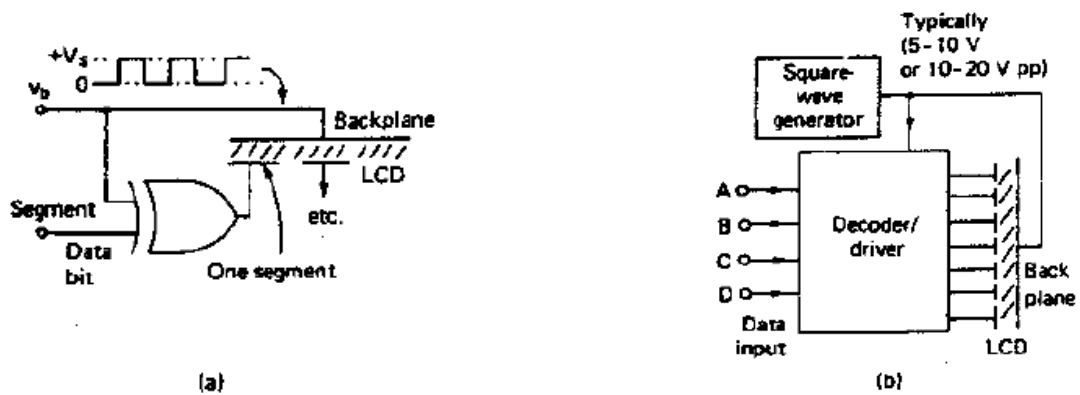
I. Liquid Crystal Display (LCD)

– Menggunakan molekul asimetrik dalam cairan organic transparan

– Orientasi molekul diatur dengan medan listrik eksternal

– *Polarizer* membatasi cahaya lewat hanya untuk polarisasi optik tertentu saja, cahaya ini dapat kembali lolos setelah dipantulkan bila polarisasinya tidak berubah

– Medan listrik pada *liquid crystal* mengubah polarisasi 90°, sehingga pantulan tidak dapat melewati *polarizer* (tampak gelap).

Gambar 3.96 Kontruksi Liquid Crystal Display (LCD)

– Tegangan pembentuk medan listrik dibuat intermiten untuk memperpanjang umur pemakaian

Gambar 3.97 Rangkaian uji Liquid Crystal Display (LCD)

Contoh Soal

1. Sebuah sumber gelombang mikro menghasilkan pulsa radiasi 1 GHz dan total energi 1 Joule. Tentukan berapa energi per photon dihasilkan, dan jumlah photon dalam pulsa.

Jawab:

(a) Energi per photon : Wp = h.f (J)

$Wp = (6,63 \times 10^{-34} \text{ J/s})\ (10^{9}/\text{s})$

$= 6,63 \times 10^{-25}$ J

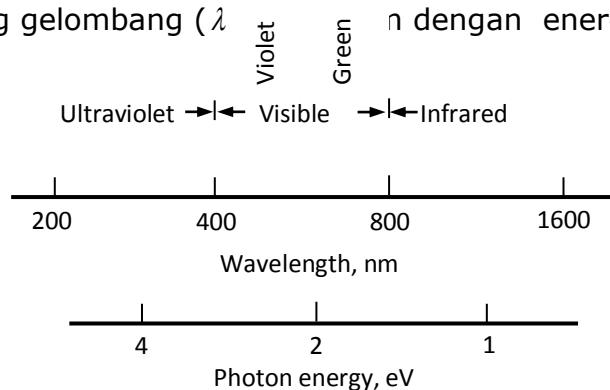
(b) Jumlah photon : $N = \frac{W}{Wp}$

$$N = \frac{1J}{6.63x10^{-25} J / photon} = 1,5x10^{24}\ photons$$

2. Apa yang dimaksud dengan spektrum warna yang visible.

Jawab:

Spektrum warna gelombang EM (cahaya) yang visible adalah spektrum warna cahaya yang dapat dilihat oleh mata biasa, warna ini berada pada daerah panjang gelombang (λ [illegible] n dengan energi photon 2,48 eV.

Violet
Green
Ultraviolet →|← Visible →|← Infrared
200 400 800 1600
Wavelength, nm
4 2 1
Photon energy, eV

3. Sebutkan beberapa buah contoh sensor cahaya yang anda ketahui

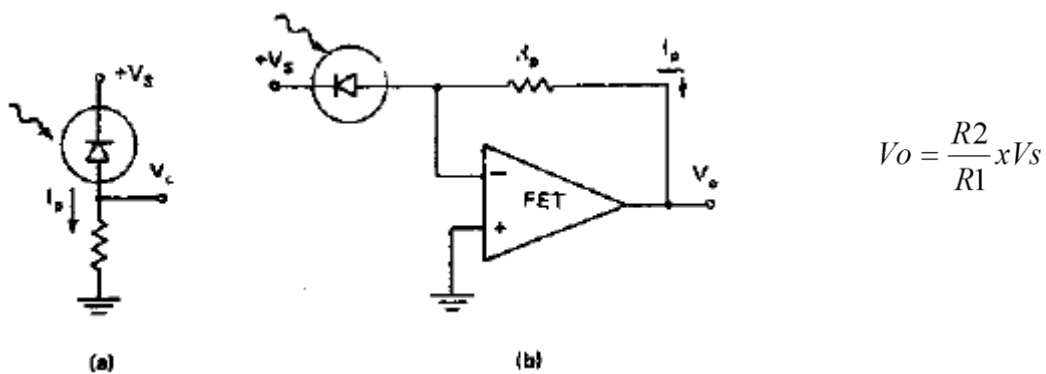
Jawab:

Sensor cahaya antara lain: Dioda foto, transistor foto, foto cell, photovolatik, photo multiplier, LED, LDR, pirometer optik

4. Bagaimana merubah arus menjadi tegangan pada sensor dioda foto

Jawab:

Rangkaian untuk merobah arus menjadi tegangan pada dioda foto adalah:

$$Vo = \frac{R2}{R1} x Vs$$

5. Apa kekurangan yang ada pada photomultiplier

Jawab:

- Kerugian
  - Mudah rusak bila terekspos pada cahaya berlebih (terlalu sensitif)
  - Perlu catu tegangan tinggi
  - Mahal

Rangkuman

1. Sensor adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk mendeteksi gejala-gejala atau sinyal-sinyal yang berasal dari perubahan suatu energi seperti energi listrik, energi fisika, energi kimia, energi biologi, energi mekanik dan sebagainya.
   Contoh; Camera sebagai sensor penglihatan, telinga sebagai sensor pendengaran, kulit sebagai sensor peraba, LDR (*light dependent resistance*) sebagai sensor cahaya, dan lainnya.
2. Transduser adalah sebuah alat yang bila digerakan oleh suatu energi di dalam sebuah sistem transmisi, akan menyalurkan energi tersebut dalam bentuk yang sama atau dalam bentuk yang berlainan ke sistem transmisi berikutnya". Transmisi energi ini bisa berupa listrik, mekanik, kimia, optic (radiasi) atau thermal (panas).
3. Peryaratan umum Sensor dan Transduser, yaitu : Linieritas, sensitivitas dan tanggapan waktu.
4. Secara umum berdasarkan fungsi dan penggunaannya sensor dapat dikelompokan menjadi 3 bagian yaitu: sensor thermal (panas), sensor mekanis, dan sensor optik (cahaya).
5. Sensor yang sering digunakan untuk sensor kecepatan angular adalah tacho generator. Tacho generator adalah sebuah generator kecil yang membangkitkan tegangan DC ataupun tegangan AC.
6. Elemen-elemen sensitive cahaya merupakan alat terandalkan untuk mendeteksi energi cahaya. Alat ini melebihi sensitivitas mata manusia terhadap semua spectrum warna dan juga bekerja dalam daerah-daerah ultraviolet dan infra merah.

Evaluasi

B. Evaluasi Diri

PenilaianDiri					
Evaluasi diri ini diisi oleh siswa, dengan memberikan tanda ceklis pada pilihan penilaian diri sesuai kemampua siswa bersangkutan.					
No	**Aspek Evaluasi**	**Penilaian diri**			
		Sangat Baik (4)	**Baik (3)**	**Kurang (2)**	**Tidak Mampu (1)**
A	**Sikap**				
1	Disiplin				
2	Kerjasama dalam kelompok				
3	Kreatifitas				
4	Demokratis				
B	**Pengetahuan**				
1	Saya mampu Memahami Sensor dan transduser sesuai jenis serta karakteristik pengerjaan komponen				
2	Saya mampu memilih jenis Sensor dan transduser sesuai perencanaan produk				
C	**Keterampilan**				
1	Saya mampu memilih dan menggunakan alat bantu berdasarkan jenis dan karakteristik pengerjaan komponen				
2	Saya mampu merancang komponen instrumen logam yang akan dikerjakan				

Review **:**

1) Apa yang dimaksud dengan sensor, transduser dan alat ukur
2) Jelaskan perbedaan ketiganya.
3) Persyaratan umum sensor dan transduser adalah linearitas, sensitivitas dan tanggapan respon. Jelaskan maksud dari masing-masing syarat tersebut.
4) Jelaskan perbedaan antara transduser aktif dan transduser pasif.
5) Gambarkan kontruksi dari sensor bimetal, termokopel dan termistor
6) Kenapa sensor RTD lebih diunggulkan pemakaiannya dari pada sensor thermal jenis lainnya
7) Kenapa sensor RTD lebih diunggulkan pemakaiannya dari pada sensor thermal jenis lainnya
8) Untuk mendeteksi suhu kerja dibawah nol darajat, sensor jenis mana yang paling tepat digunakan
9) Jelaskan cara kerja sensor infrared pyrometer
10) Jelaskan dengan gambar yang dimaksud dengan tanggapan linear dan non linear ?
11) Adakah ketentuan lain yang harus diketahui dalam memilih sensor dan transduser
12) Apa fungsi dan kegunaan *external sensor* pada sebuah robot ?
13) Sebutkan beberapa buah transduser aktif dan transduser pasif yang anda ketahui ?
14) Sebutkan ada berapa macam cara kalor subtract dapat mengalir dalam media padat, cair dan gas.
15) Sebutkan batas temperatur operasi kerja dari sensor thermal yang anda ketahui
16) Sebutkan keunggulan sensor suhu jenis RTD dari pada sensor termokopel.
17) Jelaskan cara kerja LVDT yang digunakan sebagai sensor posisi.
18) Rancanglah sebuah sistem kontrol level cairan yang menggunakan potensiometer sebagai sensor.
19) Dapatkah sensor ultrasonic digunakan untuk mengukur kedalaman laut? Jelaskan

20) Sebutkan contoh-contoh dari sensor posisi atau displacement.
21) Sebutkan beberapa contoh sensor kecepatan
22) Jelaskan salah satu prinsip operasi dari sensor tekanan
23) Sensor mana yang tepat dan sesuai digunakan sebagai pengontrol aliran fluida laminer
24) Apakah sinar LASER dapat digunakan sebagai sensor level ? Jelaskan.
25) Apa kelebihan foto transistor dibandingkan foto dioda, jelaskan
26) Bagaimana proses perubahan energi cahaya menjadi energi listrik pada photomultiplier, jelaskan
27) Apa yang dimaksud dengan pirometer optik
28) Apakah fiber optic dapat digunakan sebagai saluran energi photon dari sumber ke beban,jelaskan
29) Sebutkan spektrum warna cahaya yang anda ketahui
30) Satu spectrum warna cahaya memiliki apa saja
31) Apa sebabnya bahan semikonduktor dapat dijadikan sebagai bahan dasar sensor cahaya seperti dioda, transistor dsb.
32) Apa kelebihan pirometer optik digunakan sebagai sensor cahaya
33) Apa saja yang dapat dijadikan sebagai sumber-sumber cahaya untuk pengukuran, pengontrolan dan teknik kompensasi

PENGENDALIAN SECARA DIGITAL

Kata Kunci:

- **Encoder**
- **Decoder**
- **Multiplexer**
- **Demultiplexer**

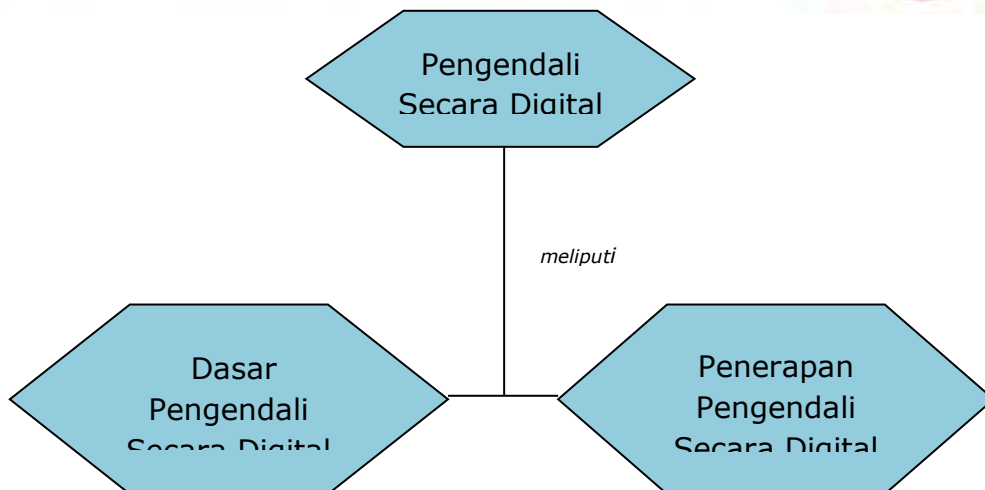
Deskripsi

Encoder adalah rangkaian logika yang berfungsi untuk mengkonversikan kode yang lebih dikenal oleh manusia ke dalam kode yang kurang dikenal manusia. Decoder adalah suatu rangkaian logika yang berfungsi untuk mengkonversikan kode yang kurang dikenal manusia kedalam kode yang lebih dikenal manusia.

Multiplexer dapat didefinisikan sebagai suatu rangkaian logika yang dapat menerima beberapa saluran data input yang terdiri dari 1 bit/lebih secara paralel dan pada outputnya hanya dilewatkan salah satu saluran data yang terpilih. Saluran data input yang terpilih dikontrol oleh beberapa saluran control yang sering disebut sebagai saluran pemilih (input select). Jumlah saluran control berkaitan erat dengan jumlah saluran data input yang akan dikontrol. Multiplekser sering juga disebut dengan selector data.

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari Bab 4 ini, Kamu diharapkan dapat:

1. Mengidentifikasi lingkup materi Pengendali Secara Digital
2. Menerapkan prinsip Pengendali Secara Digital

Rencana Belajar Siswa

Pada hari ini, ... tanggal ....tahun .... Guru beserta siswa merencanakan pelaksanaan kegiatan belajar sebagaimana tabel di bawah ini

No	Jenis kegiatan	Tanggal	Waktu	Tempat belajar	Catatan Perubahan
1	Memahami Sistem Pengendali Secara Digital				
2	Memahami Penerapan Sistem Pengendali Secara Digital				
3	Mengerjakan soal evaluasi				

............................., ...

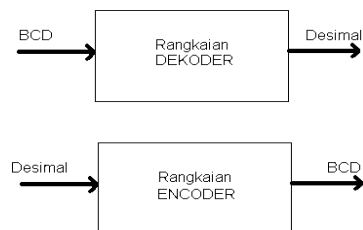
Guru | Orangtua/Wali Siswa | Siswa

.... | .... | ....

Uraian Materi

A. Encoder Dan Decoder

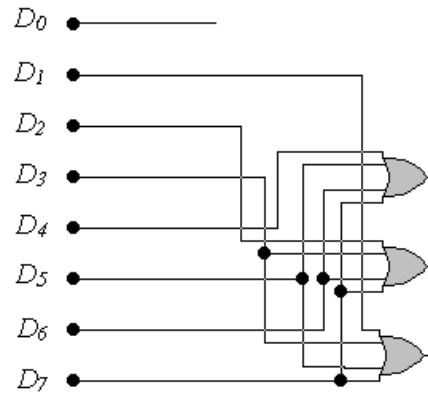
Encoder adalah suatu rangkaian logika yang berfungsi untuk mengkonversikan kode yang lebih dikenal oleh manusia ke dalam kode yang kurang dikenal manusia. Decoder adalah suatu rangkaian logika yang berfungsi untuk mengkonversikan kode yang kurang dikenal manusia kedalam kode yang lebih dikenal manusia.

Contoh:

Gambar 4.1 Blok Diagram Encoder dan Decoder

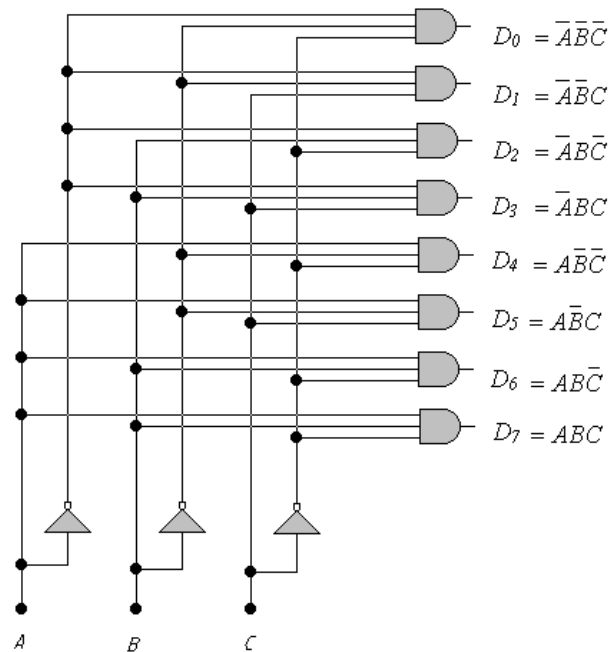
a) Encoder Oktal ke Biner

ENCODER oktal ke biner ini terdiri dari delapan input, satu untuk masing-masing dari delapan angka itu, dan tiga output yang menghasilkan bilangan binernya yang sesuai. Rangkaian itu terdiri dari gerbang OR. Berikut tabel kebenarannya.

Input								Output		
D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	A	B	C
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

Diandaikan hanya ada satu saluran input dengan logik 1 untuk setiap kalinya, seelain dari itu input tersebut tidak mempunyai arti. Tampak bahwa rangkaian itu mempunyai delapan input yang dapat memberikan 2^8 kemungkinan kombinasi, tetapi hanya delapan kombinasi yang mempunyai arti.

Gambar 4.2 Encoder oktal ke biner

b) Decoder Biner ke Octal

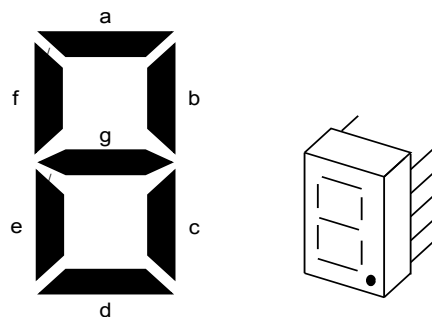
Pada decoder dari biner ke oktal ini terdapat tiga input yaitu *A*, *B* dan *C* yang mewakili suatu bilangan biner tiga bit dan delapan output yang yaitu D_0 sampai dengan D_7 yang mewakili angka oktal dari 0 sampai dengan 7.

Gambar 4.3 Decoder biner ke oktal

Dalam hal ini unsur informasinya adalah delapan angka oktal. Sandi untuk informasi diskrit ini terdiri dari bilangan biner yang diwakili oleh tiga bit. Kerja dekorder ini dapat lebih jelas tampak dari hubungan input dan output yang ditunjukan pada tabel kebenaran dibawah ini. Tampak bahwa variabel outputnya itu hanya dapat mempunyai sebuah logk 1 ntuk setiap kombinasi inputnya. Saluran output yang nilainya sama dengan 1 mewakili angka oktal yang setara dengan bilangan biner pada saluran inputnya

Input			Output							
A	B	C	D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1

.

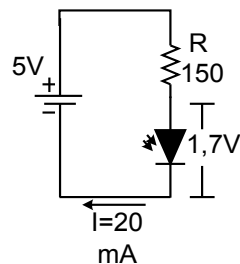
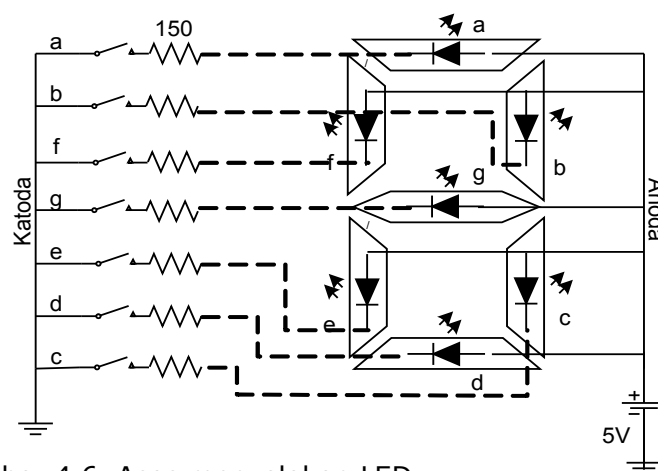
c). Peraga 7 segmen

Untuk menampilkan bilangan yang dikeluarkan oleh decoder akan dapat dipakai sebuah penampil 7-segmen *(seven segment display)*. Penampil ini terdiri dari 7-segmen yang tersusun membentuk angka-angka, ditunjukkan pada Gb.C1.

Gambar 4.4 Tampilan 7 segmen

Mengidentifikasi Segmen-Segmen Dalam Penampil 7-Segmen

Segmen-segmen ditandai dengan huruf-huruf a, b, c, d, e, f dan g. setiap segmen dapat diisi sebuah filamen yang akan berpijar apabila diaktifkan. Jenis penampil semacam ini disebut penampil pijar *(incandescent display)*. Cara memijarkan tidak beda dengan lampu-lampu pijar biasa.

Jenis penampil lain adalah yang segmen-segmennya mengandung tabung gas *(gas discharge tube)*, yang beroperasi dengan tegangan tinggi. Penampil ini berpendar dengan warna jingga. Ada pula penampil pendaran *(fluorescent tube)* yang mengeluarkan cahaya kehijauan, dan beroperasi dengan tegangan rendah.

Penampil yang banyak dipakai adalah yang menerapkan LED *(Light Emitting Diode).* Untuk menyalakan LED diterapkanlah sirkit seperti pada Gb.C2. R=150Ω berfungsi untuk membatasi arus agar bertahan pada 20mA. Tanpa R, LED akan terbakar. Pada LED akan terdapat tegangan kira-kira 1,7V.

Gambar 4.5 Sirkit untuk menyalakan LED

Gambar 4.6 Asas menyalakan LED

LED yang dibumikan (lewat R=150 Ω) akan menyala.

Setiap segmen didalam penampil pada Gb.C1 berisi satu LED. Adapun asasnya hubungan LED ditunjukkan dalam Gb.C3, yaitu anoda-anoda disatukan dan diberi potensial +Vcc (5V). katodalah yang diberi logik 0 atau 1 dari dekoder lewat R=150Ω. Apabila saklar ditutup, maka katoda yang bersangkutan memperoleh logik 0 dan LED itupun menyala, sebab sirkit baterai tertutup. Pada Gb.C4 ditunjukkan angka-angka yang akan dapat ditampilkan oleh tujuh segmen.

Gambar 4.7 Angka-angka yang akan dapat ditampilkan oleh 7-segmen

Sebagai contoh, untuk menyalakan atau menampilkan angka 6, maka saklar a, c, d, e, f, dan g harus ditutup, sehingga segmen-segmen a, c, d, e, f, dan g pun menyala. Dalam pelaksanaan praktek, segmen-segmen a hingga g dikoneksikan langsung pada keluaran a hingga g pada dekoder. Keluaran yang aktif akan meng-*ground*-kan segmen yang berkoneksi padanya, sehingga segmen tersebut menyala. Contoh, keluaran pada dekoder (a, b, c) aktif, maka output-output itu masing-masing meng-*ground*-kan katodanya LED yang ada di segmen a, b, dan c, sehingga tampilah 7.

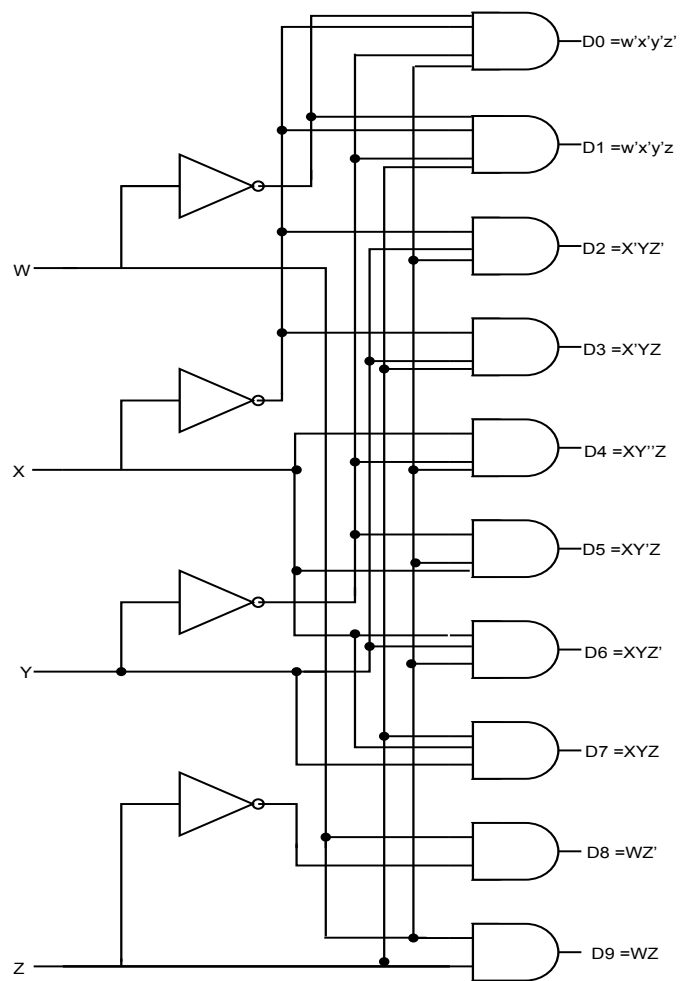
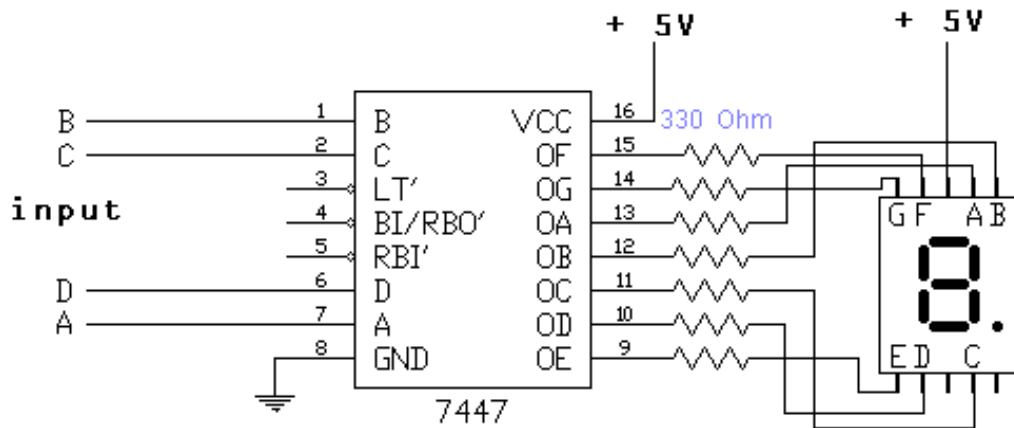
d) Decoder BCD ke Desimal

Rangkaian Dekoder BCD ke desimal ditunjukan pada gambar D2. Unsur informasi dalam hal ini adalah sepuluh angka desimal yang diwakili oleh sandi BCD. Masing-masing keluarannya sama dengan 1 hanya bila

variabel masukannya membentuk suatu kondisi bit yang sesuai dengan angka desimal yang diwakili oleh sandi BCD itu. Tabel D2 menunjukkan hubungan masukan dan keluaran dekoder tersebut. Hanya sepuluh kombinasi masukan pertama yang berlaku untuk penentuan sandi itu, enam berikutnya tidak digunakan dan menurut definisi, merupakan keadaan tak acuh. Jelas keadaan tak acuh itu pada perencanaannya digunakan untuk menyederhanakan fungsi keluarannya, jika tidak setiap gerbang akan memerlukan empat masukan. Untuk kelengkapan analisis tabel D2 memberikan semua keluaran termasuk enam kombinasi yang tidak terpakai dalam sandi BCD itu; tetapi jelas keenam kombinasi tersebut tidak mempunyai arti apa-apa dalam rangkaian itu.

Dekoder dan enkoder itu banyak sekali dipakai dalam sistem digital. Dekoder tersebut berguna untuk memperagakan unsur informasi diskret yang tersimpan dalam register. Misalnya suatu angka desimal yang disandikan dalam BCD dan tersimpan dalam register empat sel dapat diperagakan dengan pertolongan rangkaian dekoder BCD ke desimal dimana keluaran keempat sel biner tersebut diubah sehingga menyalakan 10 lampu penunjuk. Lampu penunjuk itu dapat berupa angka peraga *(display digit)*, sehingga suatu angka desimal akan menyala bila keluaran dekoder yang sesuai adalah logika 1. Rangkaian dekoder juga berguna untuk menentukan isi register dalam proses pengambilan keputusan. Pemakaiannya yang lain adalah untuk membangkitkan sinyal waktu dan sinyal urutan untuk keperluan pengaturan.

Tabel 4.1
kebenaran decoder BCD ke decimal

Masukan				Keluaran									
w	x	y	z	D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1

Gambar 4.8 Dekoder BCD ke decimal

Gambar 4.9 Rangkaian Decoder BCD 7 segmen kommon anoda

Decoder BCD ini ada 2 macam yaitu yang outputnya aktif level tinggi dan yang outputnya aktif rendah sehingga membutuhkan 7 segmen yang berbeda. Untuk aktif level tinggi menggunakan 7 segmen kommon katoda, sedangkan untuk aktif level rendah menggunakan 7 segmen kommon anoda.

Contoh *rangkaian Decoder BCD to 7segmen kommon anoda*

Tabel 4.2
Kebenaran Decoder Common Anoda

kommom anoda

D	C	B	A	g	f	e	d	c	b	a
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1
1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1
1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

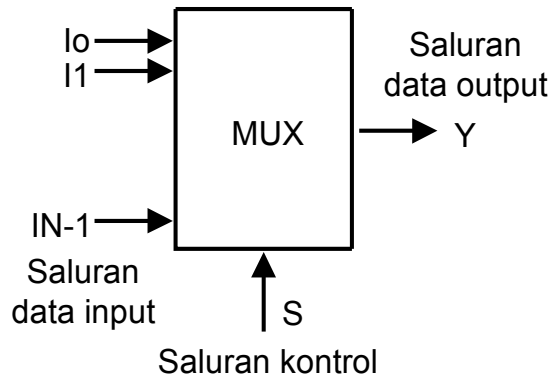
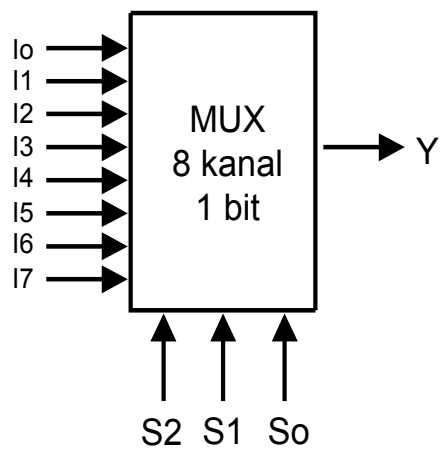
Tabel 4.3
Kebenaran Decoder Common Katoda

kommon katoda

D	C	B	A	g	f	e	d	c	b	a
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0
0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1
0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1
0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1
1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0
1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1
1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

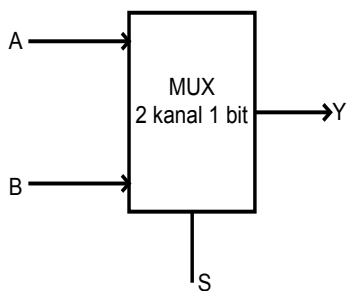
Dengan demikian untuk peraga 7 segmen jenis common cathode memerlukan decoder dengan output jenis active high untuk menyalakan setiap segmennya, sedangkan untuk peraga 7 segmen jenis common anode memerlukan decoder dengan output jenis active low.

B. Multiplexer dan Demultiplexer

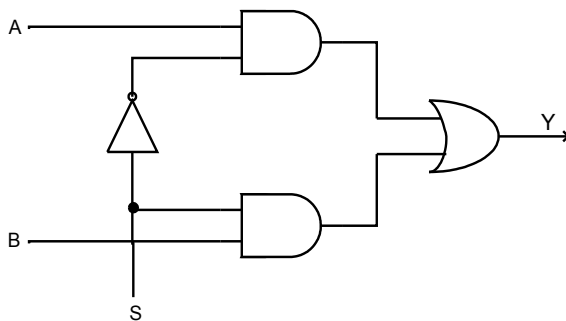
Multiplexer dapat didefinisikan sebagai suatu rangkaian logika yang dapat menerima beberapa saluran data input yang terdiri dari 1 bit/lebih secara paralel dan pada outputnya hanya dilewatkan salah satu saluran data yang terpilih. Saluran data input yang terpilih dikontrol oleh beberapa saluran control yang sering disebut sebagai saluran pemilih (input select). Jumlah saluran control berkaitan erat dengan jumlah saluran data input yang akan dikontrol. Multiplekser sering juga disebut dengan selector data. Diagram sebuah multiplekser secara umum :

Contoh multiplekser 8 kanal 1 bit :

Gambar 4.10 Diagram multiplekser

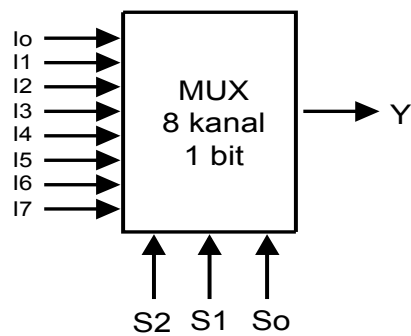
Contoh soal :

1. Rancanglah sebuah MUX 2 kanal 1 bit.

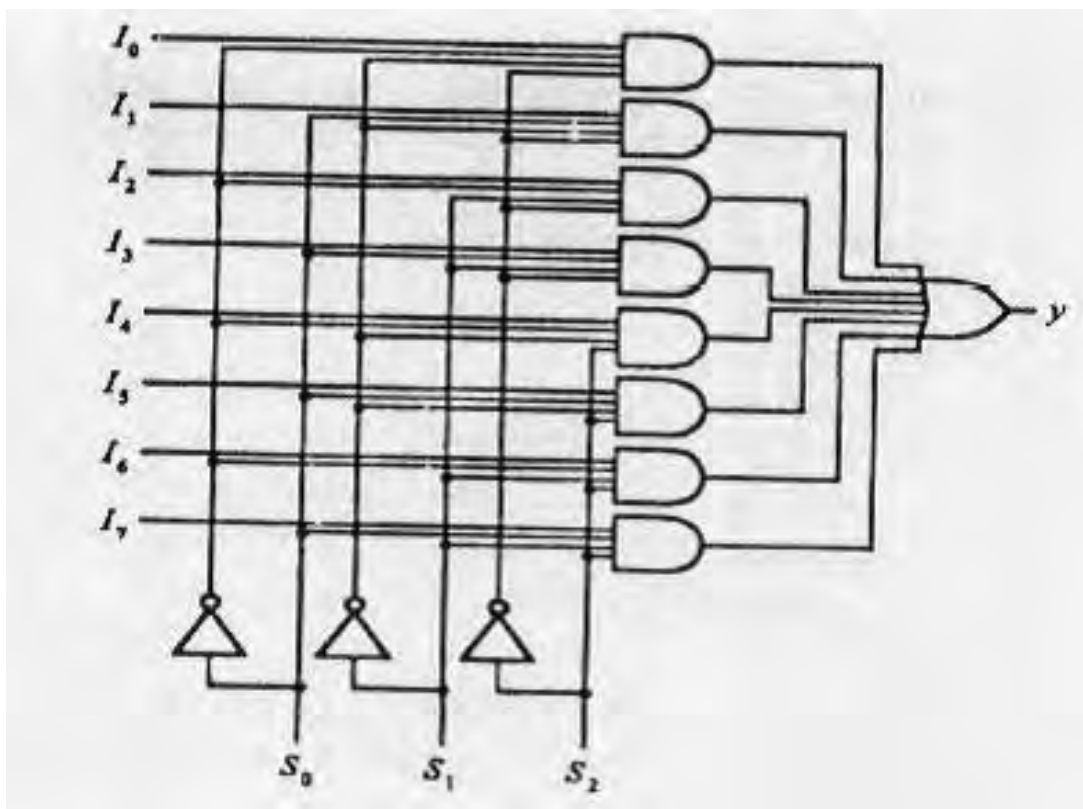
Jawab :

Tabel kebenaran MUX 2 kanal 1 bit

Selector (S)	Output (Y)
0	S'A
1	SB

Rangkaian dalam MUX 2 kanal 1 bit

2. Rancanglah MUX 8 kanal 1 bit.

Jawab :

Tabel kebenaran MUX 8 kanal 1 bit

S_2	S_1	S_0	Output (Y)
0	0	0	I_0
0	0	1	I_1
0	1	0	I_2
0	1	1	I_3
1	0	0	I_4
1	0	1	I_5
1	1	0	I_6
1	1	1	I_7

Rangkaian dalam MUX 8 kanal 1 bit

Gambar 4.11 Rangkaian dalam MUX 8 kanal 1 bit

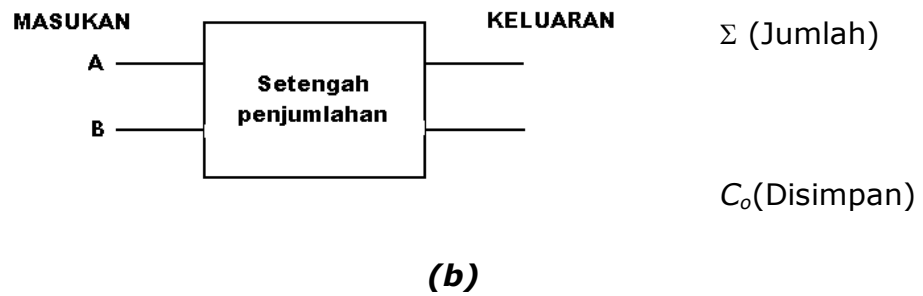
C. Penjumlahan dan Pengurangan

a) Penjumlahan

1. Half Adder

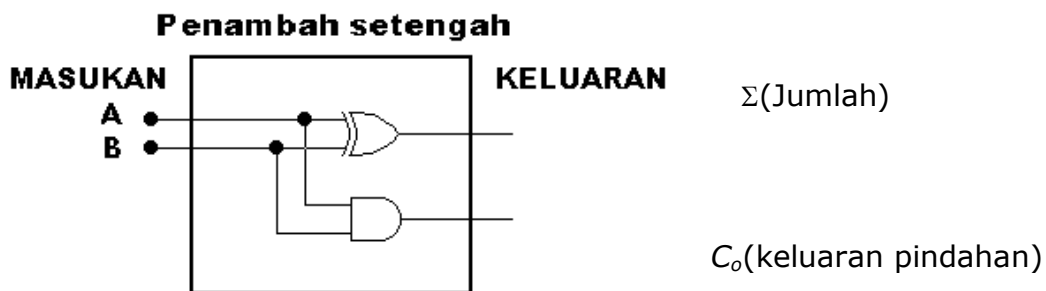
Tabel penambahan pada gambar 4.12 *(a)* dapat kita anggap sebagai tabel kebenaran. Angka yang ditambahkan ada pada posisi masukan tabel. Pada gambar 4.12 *(a)*, masukan ini merupakan kolom masukan *A* dan *B*. Tabel kebenaran membutuhkan dua kolom keluaran, satu kolom untuk jumlah dan satu kolom untuk pindahan.

MASUKAN		KELUARAN	
B	*A*	Σ	C_o
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1
Penambahan digit biner		Jumlah	Disimpan
		XOR	AND

(a)

Gambar 4.12 Penambahan setengah. *(a)* Tabel kebenaran. *(b)* simbol blok

Kolom jumlah diberi label dengan simbol Σ. Kolom pindahan diberi label dengan C_o. C_o singkatan untuk keluaran pindahan atau *carry out*. Simbol blok yang cocok untuk penambahan yang memberikan fungsi tabel kebenaran tersebut diperlihatkan pada gambar 4.11 *b)*. Rangkaian ini disebut rangkaian *penambah setengah*. Rangkaian-penambah-setengah mempunyai masukan (*A,B*) dan dua keluaran (Σ, C_o).

Lihat dengan teliti tabel kebenaran penambah-setengah pada gambar 4.12*(a)*. Bagaimana bentuk boolean yang diperlukan untuk keluaran C_o? Bentuk boolean itu ialah $A \cdot B = C_o$ kita membutuhkan dua gerbang AND dua masukan untuk membuat keluaran C_o.

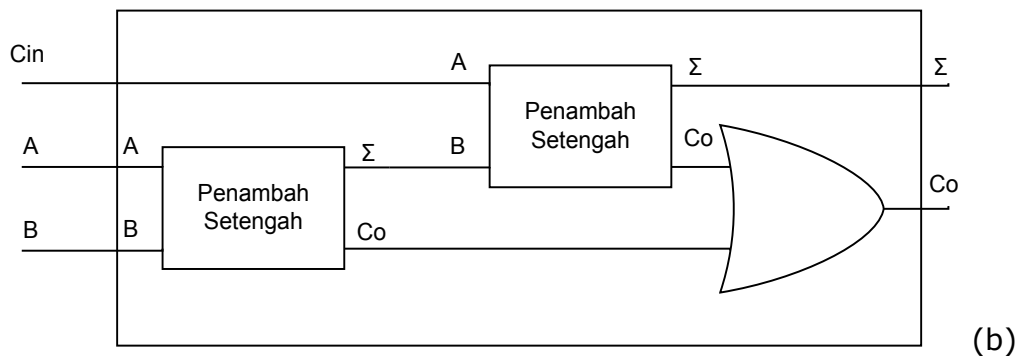
Sekarang bagaimana bentuk boolean untuk jumlah keluaran (Σ) dari setengah penambahan pada gambar 4.12*(a)*? Bentuk boolean tersebut ialah $\overline{A} \cdot B + A \cdot B = \Sigma$. Kita dapat menggunakan dua gerbang AND dan satu gerbang OR untuk melakukan pekerjaan ini. Bila dilihat lebih dekat, anda akan mendapatkan bahwa pola ini juga merupakan gerbang XOR. Kemudian bentuk boolean yang disederhanakan menjadi $A \oplus B = \Sigma$. Dengan kata lain kita hanya memerlukan satu gerbang XOR 1-masukan untuk menghasilkan keluaran jumlah tersebut.

Gambar 4.13 Diagram logika untuk penambah setengah

Dengan menggunakan gerbang AND dua masukan, suatu diagram simbol logika untuk penambahan setengah kita nyatakan pada gambar 4.13 rangkaian penambah_setengah hanya menambahkan kolom LSB (kolom 1) pada persoalan penambah biner. Untuk bagian 2-an, 4-an, 8-an, 16-an dan sebagainya, dalam penambahan biner, harus kita gunakan rangkaian yang disebut *penambah lengkap*.

2. Full Adder

Gambar 4.14 merupakan bentuk singkat dari tabel penambahan biner, dengan situasi **1** + **1** + **1**. Tabel kebenaran memperlihatkan semua kombinasi yang mungkin dari *A, B,* dan C_{in} (masukan pindahan). Tabel kebenaran ini untuk panambah lengkap. Penambah lengkap digunakan untuk semua harga bagian biner, kecuali bagian 1-an. Bila diinginkan suatu masukan pindahan tambahan maka kita harus gunakan penambah lengkap. Diagram blok dari penambah lengkap diperlihatkan pada gambar 4.12(b). Penambah lengkap mempunyai 3 masukan ; C_{in}, *A*, dan *B*. Untuk mendapatkan keluaran Σ dan C_o tiga masukan tersebut harus kita tambahkan.

Tabel 4.5
Kebenaran Full Adder

MASUKAN			KELUARAN	
C	B	A	Σ	Co
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1
Pindahan + B +A			Jumlah	Carry Out

Gambar 4.14 Diagram blok dari penambah lengkap

3. Parallel Adder

Dua bilangan biner n bit masimg-masing dapat dijumlahkan dengan rangkaian tersebut. Untuk membuktikannya dengan contoh khas, tinjau dua bilangan biner, A = 1011 dan B = 0011, yang jumlahnya adalah S = 1110. bila suatu pasangan bit dijumlahkan dengan suatu penjumlahan penuh, rangkaian itu menghasilkan bawaan yang akan digunakan dengan pasangan bit pada kedudukan yang lebih berarti yang lebih tinggi. Hal itu ditunjukkan dalam tabel berikut.

Tabel 4.6

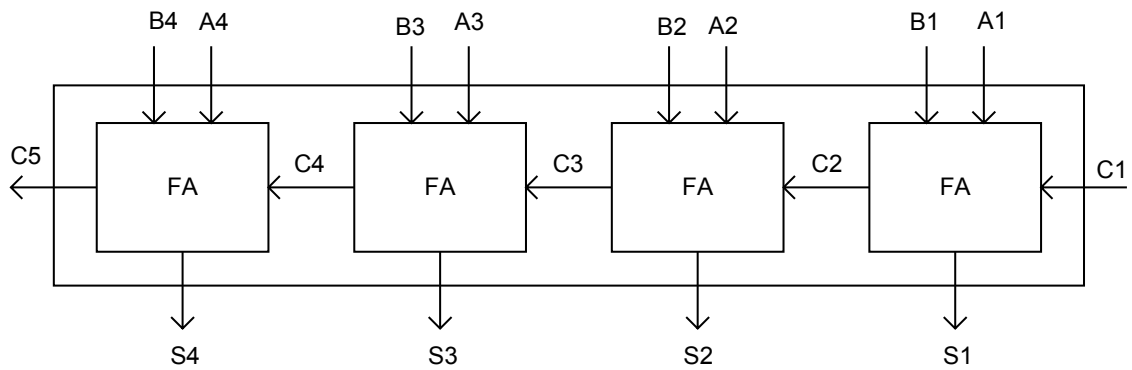
Penjumlah biner parallel

MASUKAN			KELUARAN	
C	B	A	Σ	Co
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1
Pindahan + B +A			Jumlah	Carry Out

Dalam tabel 4.6 itu, bit dijumlahkan oleh penjumlah penuh, dengan dimulai dari kedudukan berarti terendah (subskrip 1), untuk membentuk bit jumlah dan bit bawaan. Masukan dan keluaran rangkaian penjumlahan

penuh pada gambar 4.15 juga ditunjukkan dalam tabel 8.1. Bawaan masukan C1 pada kedudukan berarti terendah harus 0. Nilai Ci+1 dalam suatu kedudukan berarti tertentu adalah bawaan keluaran penjumlahan penuh itu. Nilai tersebut dipindahkan ke bawaan masukan penjumlahan penuh yang menjumlah bit itu satu kedudukan berarti lebih tinggi ke kiri. Bit jumlah itu dibangkitkan berawal dari kedudukan terkanan dan tersedia segera setelah bit bawaan sebelumnya didapatkan.

Jumlah dua bilangan biner n-bit, A dan B, dapat diperoleh dalam dua cara: secara seri atau parallel. Cara seri hanya menggunakan satu rangkaian penjumlahan penuh dan suatu peralatan penyimpan untuk menahan bawaan keluaran yang dihasilkan. Pasangan bit dalam A dan B dipindahkan secara seri, satu demi satu, melalui penjumlahan penuh tunggal untuk menghasilkan sederetan bit keluaran sebagai jumlahnya. Bawaan keluaran yang tersimpan dari suatu pasangan bit itu digunakan sebagai bawaan masukan untuk pasangan bit berikutnya. Cara seri ini akan ditinjau lebih lanjut dalam Bab Sembilan. Cara parallel menggunakan n rangkaian penjumlahn penuh, dan semua bit pada A dan B dikenakan secara serentak. Bawaan keluaran dari suatu penjumlah penuh dihubungkan ke bawaan masukan penjumlah penuh satu kedudukan di kirinya. Segera setelah bawaan itu dihasilkan, bit jumlah yang benar muncul dari keluaran jumlah semua penjumlah penuh itu.

Suatu penjumlah paralel biner adalah suatu fungsi digital yang menghasilkan jumlah aritmatika dua bilangan biner secara paralel. Fungsi itu terdiri dari sejumlah penjumlahan penuh yang dihubungkan secara bertigkat, dengan bawaan keluaran dari suatu penjumlah penuh yang dihubungkan ke bawaan masukan penjumlahan penuh berikutnya.

Gambar 4.15 Penjumlah paralel 4 bit

Gambar 4.15 menunjukkan hubungan empat rangkaian penjumlah penuh (full adder) untuk memberikan suatu penjumlah paralel 4 bit. Bit yang ditambah A dan bit penambah B ditunjukkan oleh bilangan subskrip dari kanan ke kiri, dengan subskrip I yang menyatakan bit tingkat rendah. Bawaan itu dihubungkan secara berantai sepanjang penjumlahan penuh tersebut. Bawaan masukan ke penjumlah itu adalah C1 dan bawaan keluarannya adalah C5. Keluaran S menghasilkan bit jumlah yang diperlukan. Bila rangkaian penjumlah penuh 4 bit itu dikemas dalam suatu kemasan IC, kemasan itu mempunyai empat kutub untuk bit ditambah, empat kutub untuk bit penambah, empat kutub untuk it jumlah, dan dua kutub untuk bawaan masukan dan keluaran. Contoh penjumlahan penuh 4 bit semacam itu adalah TTL jenis IC 74283.

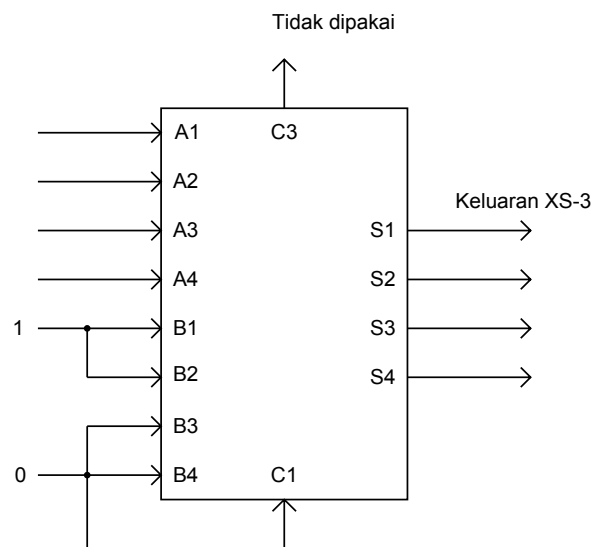
Suatu penjumlahan biner n-bit memerlukan n penjumlah penuh. Rangkaian itu dapat dibuat dari IC penjumlah penuh 4 bit, 2 bit, dan 1 bit dengan menghubungkan beberapa kemasan secara bertingkat. Bawaan keluaran dari suatu kemasan harus dihubungkan ke bawaan masukan yang lain dengan bit tingkat tinggi berikutnya.

Penjumlahan penuh 4 bit adalah suatu contoh khas fungsi MSI. Penjumlahan itu dapat digunakan dalam berbagai pemakaian yang meliputi operasi aritmatika. Dapat dibuktikan bahwa bila rancangan rangkaian itu dilakukan dengan cara klasik memerlukan satu tabel kebenaran dengan

2^9=512 baris, karena terdapat sembilan masukan ke rangkaian tersebut. Dengan cara iterasi pemakaian fungsi yang diketahui secara bertingkat-tingkat, dapat diperoleh suatu implementasi sederhana dan teratur rapi.

Contoh lain penggunaan MSI penjumlah biner 4 bit itu untuk fungsi logika acak diberikan dalam contoh Di bawah.

Contoh: Rancangkan suatu pengubah sandi BCD ke XS-3.

Jawab:

Gambar 4.16 Pengubah sandi BCD ke XS-3

Rangkaian yang diperoleh dari rancangan itu ditunjukkan dalam gambar 4.16 dan memerlukan 11 gerbang. Bila diimplementasikan dengan gerbang SSI, akan memerlukan 3 kemasan IC dan 15 hubungan kawat dalam (tidak meliputi hubungan masukan dan keluaran). Pengamatan pada tabel kebenaran menunjukkan bahwa sandi setara XS-3 dapat diperoleh dari sandi BCD dengan menambahkan biner 0011. Penambahan tersebut dapat dengan mudah diimplementasikan dengan pertolongan suatu rangkaian MSI penjumlah penuh 4 bit, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 4.15. Angka BCD diberikan ke masukan A. Masukan B dibuat tetap sama dengan 0011. Hal itu dilakukan dengan menggunakan logika-1 ke B1 dan B2 dan logika 0 ke B3,B4, dan C1. Logika 1 dan logika 0 itu adalah sinyal fisik yang nilainya

tergantung pada keluarga logika IC yang dipakai. Untuk rangkaian TTL, logika 1 setara 3,5 volt, dan logika 0 setara dengan tanah. Keluaran S pada rangkaian itu memberikan sandi XS-3 yang setara dengan angka BCD masukannya.

Implementasi tersebut memerlukan satu kemasan IC dan lima hubungan kawat, tidak termasuk kawat masukan dan keluarannya.

4. BCD Adder

Komputer atau kalkulator yang melaksanakan operasi aritmatika langsung dalam sistem bilangan decimal mewakili bilangan decimal dalam bentuk sandi biner. Suatu penjumlah semacam itu harus menggunakan rangkaian aritmatika yang menerima bilangan desimal yang disandikan dan memberikan hasilnya dalam sandi yang telah disetujui. Untuk penjumlahan biner, untuk setiap kalinya cukup ditinjau sepasang bit yang berarti dan suatu bawaan sebelumnya. Suatu penjumlah desimalmemerlukan sekurang-kurangnya sembilan masukan dan lima keluaran karena empat bit diperlukan untuk menyandikan masing-masing bilangan desimal dan rangkaian itu harus mempunyai sebuah bawaan masukan dan sebuah bawaan keluaran. Tentu saja, terdapat berbagai macam rangkaian penjumlah desimal yang dapat dibuat, tergantung pada sandi yang dipergunakan untuk mewakili angka desimal itu.

Rancangan suatu rangkaian kombinasi sembilan masukan, lima keluaran menurut metoda klasik akan memerlukan suatu tabel kebenaran dengan 2^9=512 isian. Banyak di antara kombinasi masukan itu adalah keadaan tak acuh, karena masing-masing masukan andi biner mempunyai enam kombinasi yang tidak terpakai. Fungsi Boole yang disederhanakan untuk rangkaian itu dapat diperoleh dengan suatu cara tabel yang dihasilkan oleh komputer, dan hasilnya mungkin akan merupakan suatu hubungan antar gerbang dengan pola yang tidak teratur. Suatu prosedur lainnya adalah menjumlah bilangan itu dengan rangkaian penjumlah penuh, dengan memperhitungkan kenyataan bahwa enam kombinasi dalam masing-masing maukan 4 bit itu tidak terpakai. Keluarannya harus disesuaikan sedemikian

hingga hanya kombinasi biner yang merupakan kombinasi untuk sandi decimal itu saja yang dihasilkan.

Dalam bagian ini akan ditinjau suatu penjumlahan aritmatika dua angka decimal dalam BCD, bersama-sama dengan suatu bawaan yang mungkin dari suatu tingkat sebelumnya. Karena masing-masing angka masukan itu tidak melebihi 9, jumlah keluarannya tidak dapat lebih dari 9 + 9 +1 = 19, 1 dalam jumlah itu adalah bawaan masukan. Penjumlah itu membentuk jumlah dalam bentuk biner dan menghasilkan suatu hasil yang dapat berkisar dari 0 sampai dengan 19. Bilangan biner tersebut diberikan dalam tabel 8.2 dan diberi tanda dengan lambing K, Z8, Z4, Z2, dan Z1. K adalah bawaan, dan subskrip di bawah huruf Z mewakili bobot 8, 4, 2, dan 1 yang dapat diberikan ke empat bit dalam sandi BCD. Kolom pertama dalam tabel itu memberikan jumlah biner sebagaimana yang muncul pada keluaran suatu penjumlah biner 4 bit. Jumlah keluaran dua angka desimal harus diwakili dalam BCD dan harus muncul dalam bentuk yang diberikan dalam kolom kedua pada tebel itu. Masalahnya adalah mencari suatu aturan sederhana sehingga bilangan biner dalam kolom pertama dapat diubah menjadi perwakilan bilangan itu dalam angka BCD yang benar pada kolom kedua.

Tabel 4.7

Penurunan penjumlah BCD

Jumlah Biner					Jumlah BCD					Desimal
K	Z8	Z4	Z2	Z1	C	S8	S4	S2	S1	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	2
0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	3
0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	4
0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	5
0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	6
0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	7
0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	8
0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	9
0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	10
0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	11
0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	12
0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	13
0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	14
0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	15
1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	16
1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	17
1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	18
1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	19

Dalam memeriksa isitabel itu, tampak bahwa bila jumlah biner itu sama dengan atau kurang dari 1001, bilangan BCD yang bersesuaian identik, dan oleh karenanya tidak diperlukan perubahan. Bila jumlah biner itu lebih besar dari 1001, didapatkan suatu perwakilan BCD yang tidak sah. Penambahan biner 6 (0110) ke jumlah biner itu mengubahnya menjadi perwakilan BCD yang benar dan juga menghasilkan bawaan keluaran yang diperlukan.

Rangkaian logika yang menyidik pembetulan yang diperlukan itu dapat diturunkan dari isian tabel tersebut. Jelas bahwa suatu pembetulan diperlukan bila jumlah biner itu mempunyai suatun bawaan keluaran K = 1. Enam kombinasi yang lain dari 1010 ampai dengan 1111 yang memerlukan pembetulan , mempunyai suatu 1 dalam kedudukan Z8. Untuk membedakan hal itu dari biner 1000 dan 1001 yang juga mempunyai suatu 1 dalam kedudukan Z8, ditetapkan lebih lanjut bahwa Z4 atau Z2 harus mempunyai suatu 1. Persyaratan untuk suatu pembetulan dan suatu bawaan keluaran dapat dinyatakan oleh fungsi Boole:

C = K + Z8Z4 + Z8Z2

Bila C = 1, perlu ditambahkan 0110 ke jumlah biner itu dan menyediakan suatu bawaan keluaran untuk tingkat berikutnya.

Untuk menambahkan 0110 ke jumlah biner itu, digunakan suatu penjumlah biner 4 bit kedua seperti yang ditunjukkan dalam gambar 8.4. Kedua angka decimal, bersama-sama dengan bawaan masukannya, mula-mula ditambahkan ke penjumlah biner 4 bit yang di kiri untuk menghasilkan jumlah biner itu. Bila bawaan keluaran itu sama dengan 0, tidak ada yang ditambahkan ke jumlah biner itu. Bila sama dengan 1, biner 0110 ditambahkan ke jumlah biner itu melalui penjumlah biner 4 bit yang di kanan. Bawaan keluaran yang dihasilkan dari penjumlah biner bawah itu dapat diabaikan karena hal itu mencatu informasi yang sudah tersedia di kutub bawaan keluaran.

Penjumlah BCD itu dapat dibentuk dengan tiga kemasan IC. Masing-masing dari penjumlah 4 bit itu adalah suatu fungsi MSI dan ketiga gerbang untuk logika pembetulan itu memerlukan satu kemasan SSI. Akan tetapi penjumlah BCD itu telah tersedia dalam satu rangkaian MSI (TTL IC jenis 82S83 adalah suatu penjumlah BCD).

Suatu penjumlah paralel desimal yang menjumlahkan n angka desimal memerlukan n tingkat penjumlah BCD. Bawaan keluaran dari suatu tingkat harus dihubungkan ke bawaan masukan tingkat lebih tinggi berikutnya.

5. Komplemen 1 Adder

Angka positif dalam system komplemen-1 bertanda adalah sama seperti di dalam sistem angka besaran bertanda, akan tetapi angka negatifnya berbeda. Untuk angka negatif ini dinyatakan dalam bentuk komplemen-1. sebagai contoh, bentuk komplemen-1 dari -19 untuk suatu sistem digital 6 bit adalah komplemen dari 010011 (+19), yaitu sama dengan 101100(-19). Begitu pula, oleh karena nol plus adalah 000000, maka nol minus untuk sistem angka komplemen bertanda 1 adalah 111111.

Diatas telah digambarkan tentang penambahan dari dua angka besaran bertanda. Selanjutnya akan digambarkan penambahan dari dua angka komplemen bertanda 1. Perbedaan utama antara kedua penambahan adalah bahwa pada penambahan dari dua angka komplemen 1, bit tanda nya ditambahkan bersama-sama dengan bit besaran. Dengan kata lain, bit tanda ditambahkan sebagaiman bit besaran.

Kasus 1

N_1 dan N_2 adalah positif.

Aturan 1

Bila N_1 dan N_2 adalah positif, tambahkan angka bertanda (tanda dan besaran). Bila bit tanda menunjukkan 1, berarti menyatakan suatu luapan (overflow).

Sebagai contoh, perhatikan penambahan 19 dan 10. Dalam bentuk komplemen-1, 19 adalah 010011 dan 10 adalah 001010, yang jumlahnya adalah :

```
  010011 (+19)
 +001010 (+10)
 _______
  011101  (+29)
```

19 tambah 19 adalah

```
  010011 (+19)
 +010010 (+19)
 _______
  100110  (+38)
```

karena bit-tanda adalah 1, berarti menyatakan suatu luapan (overflow)

Kasus 2

N_1 dan N_2 adalah negatif.

Aturan 2

Bila dua angka negatif ditambahkan, selalu terjadi muatan dekat-ujung, yang dihasilkan oleh dua bit-tanda dari angka yang ditambahkan. Muatan ini ditambahkan kepada posisi bit-tanda terkecil.

a) Bila bit-tanda dari angka yang dihasilkan adalah 1, berarti menyatakan bahwa jawaban adalah benar.

b) Bila bit tanda dari angka yang dihasilkan adalah 0, berarti menyatakan suatu luapan (overflow).

Sebagai contoh, jumlah -19 dan -10 :

101100 (-19)

+110101 (-10)

____

011101 (+29)

19 tambah 19 adalah

010011 (+19)

+010010 (+19)

100110 (+38)

karena bit-tanda adalah 1, berarti menyatakan suatu luapan (overflow)

Kasus 3

N1 dan N2 mempunyai tanda yang berbeda.

Aturan 3

Bila dua angka, N1 dan N2, yang berbeda tanda ditambahkan dan angka positif adalah lebih besar, maka akan terjadi muatan dekat ujung

yang harus ditambahkan kepada digit tanda terkecil. Bila angka negatif adalah lebih besar, maka tidak akan terjadi muatan seperti itu.

Sebagai contoh, jumlah 19 dan -10 serta jumlah -19 dan 10 adalah :

010011 (+19) 101100 (-19)

+110101 (-10) dan +001010 (+10)

———— ————

1001000 110110 (-9)

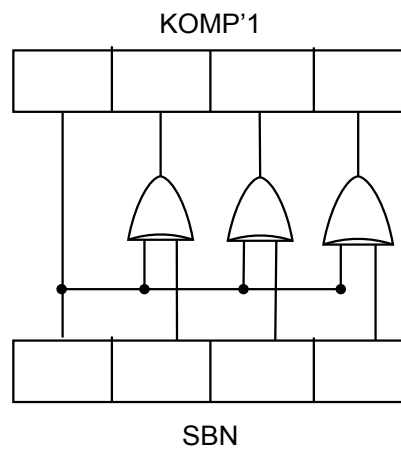
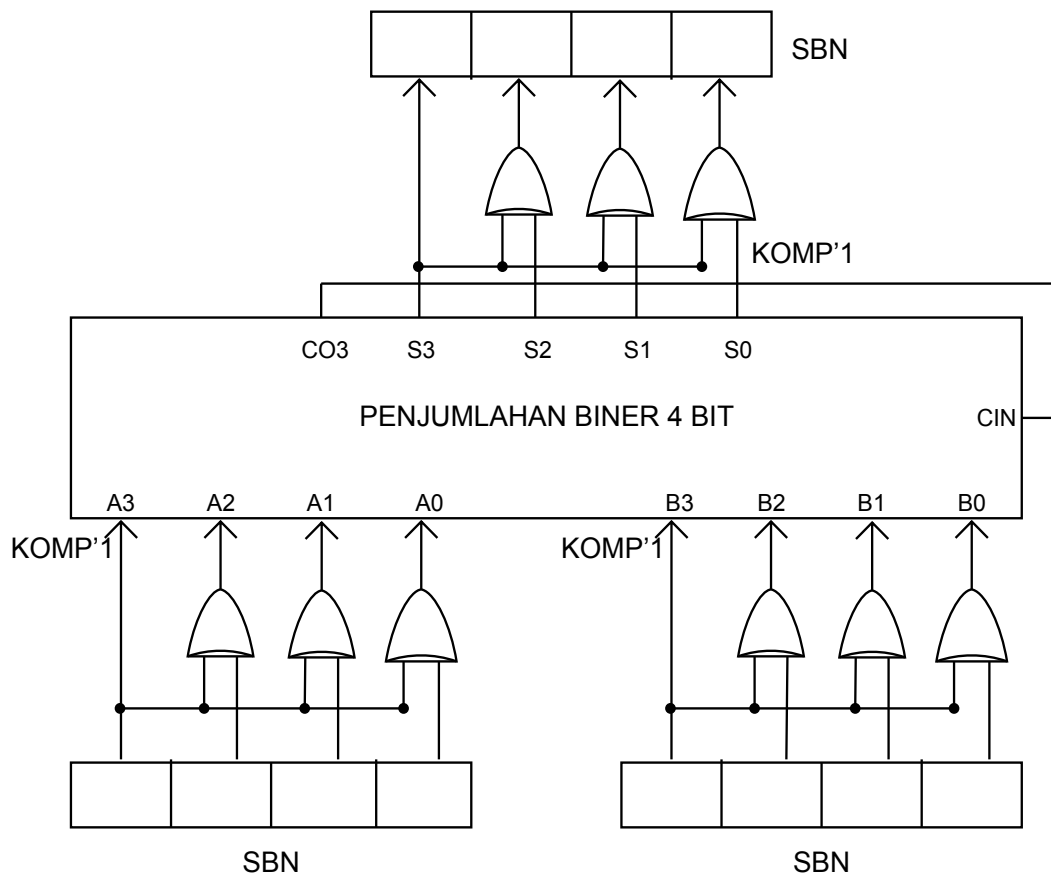
↘ +1

001001(+9)

Untuk membuat rangkaian adder dari bilangan komplemen 1, maka terlebih dahulu dibutuhkan suatu rangkaian yang bisa mengkonversi bilangan dari SBN (Signed Binary Number) ke komplemen'1. Perhatikan tabel di bawah, tabel tersebut menunjukkan perubahan bilangan dari SBN ke komplemen'1.

SBN	Komp' 1
101 1	1100
110 1	1010
011 0	0110
010 1	0101

Dari tabel di atas maka dapat dianalisa, pada digit pertama tidak mengalami perubahan, pada digit selanjutnya mengalami perubahan sesuai dengan (Gerbang EX-OR). Tabel kebenaran untuk EX-Or gate adalah

A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Gambar 4.17 Rangkaian penjumlah SBN 4 bit
yang menerapkan sistem komplemen 1

6. Komplemen 2 Adder

Dalam system ini suatu angka positif dinyatakan dalam bentuk yang sama seperti dalam dua sistem lainnya. Sedangkan angka negatif adalah dalam bentuk komplemen 2. Sebagai contoh, -10 dalam system digital 6 bit adalah 110110. ini diperoleh dari:

-10 = -32 + 22

↘ ↓

110110

hanya terdapat nol plus, yaitu semua nol; sedangkan nol minus tidak berlaku.

Penambahan dua angka positif tidak akan dibahas karena penambahan ini adalah sama seperti system komplemen 1.

Kasus 1

N1 dan N2 adalah negatif

Aturan 1

Bila N_1 dan N_2 adalah negatif, muatan harus diperhatikan. Muatan ini dihasilkan dari jumlah dua bit tanda 1. selanjutnya, bit tanda dari jumlah harus 1, karena bernilai negatif. Bila 0 menunjukkan positif dalam bit tanda, berarti menyatakan suatu luapan (overflow).

Sebagai contoh

```
  101101 (-19)
 +110110 (-10)
 -------
 1100011  (-29)
 ↙
diabaikan
```

dan

```
  101101   (-19)
 +101101   (-19)
 -------
↙ 1011010
menyatakan luapan
```

Kasus 2

N1 dan N2 mempunyai tanda yang berbeda.

Aturan 2

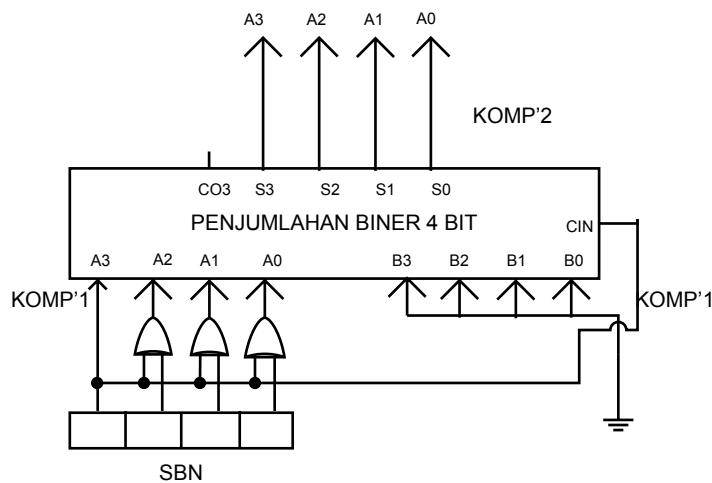
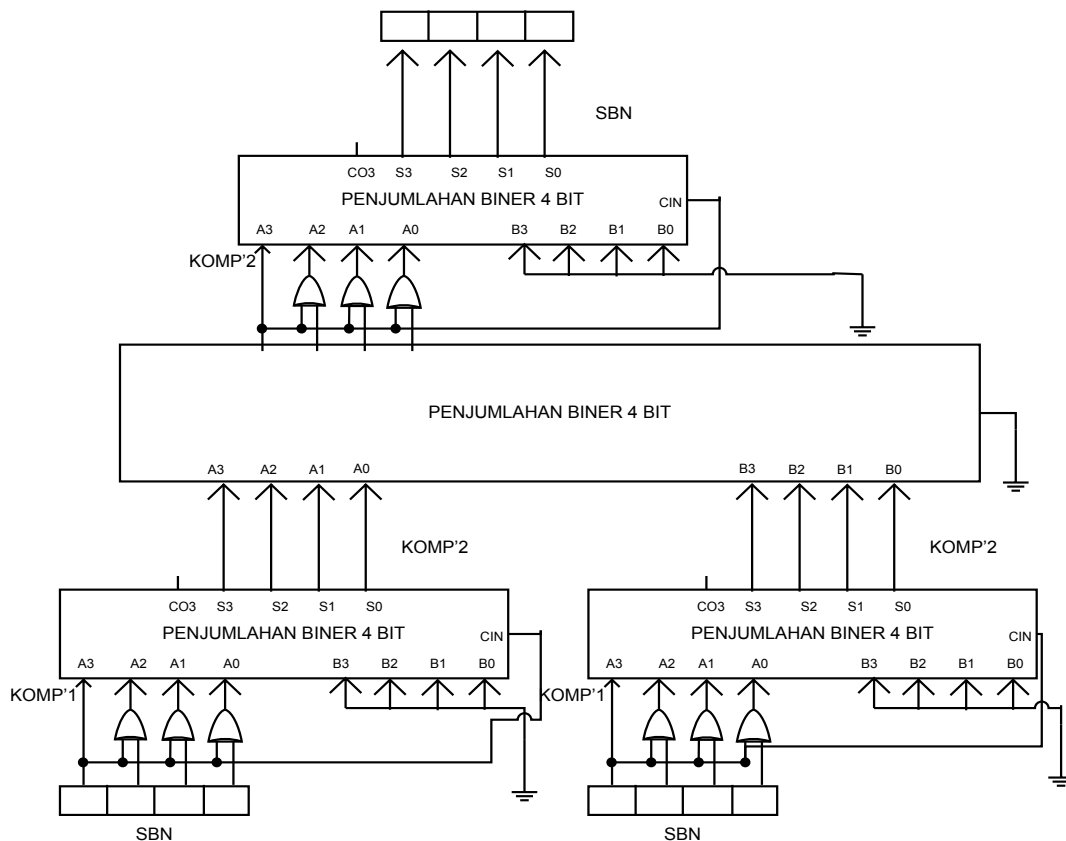
Suatu muatan ditimbulkan bila jumlah adalah positif. Dalam kasus ini, muatan diabaikan. Bila jumlah nya adalah negatif, maka tidak ditimbulkan muatan (carry).

Sebagai contoh, jumlah 19 dan -10 serta jumlah -19 dan 10 adalah :

010011	(+19)		101101	(-19)
+110110	(-10)	dan	+001010	(+10)
1001001			110111	(-9)

↙

diabaikan

Untuk membuat rangkaian adder dari bilangan komplemen 2, maka terlebih dahulu dibutuhkan suatu rangkaian yang bisa mengkonversi bilangan dari SBN (Signed Binary Number) ke komplemen’2.

Gambar 4.18 Rangkaian pengkonversi bilangan dari SBN ke komplemen 2

Gambar 4.19 Rangkaian penjumlah SBN 4 bit
yang menerapkan sistem komplemen 2

7. Carry Look Ahead Adder

Bila panjang penambah-jajar perambatan muatan khusus naik, maka waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan penambahan juga naik sebesar waktu tunda (delay time) per tingkat untuk setiap bit yang ditambahkan. Penambahan pandangan muka muatan *(the carry look ahead adder)* mengurangi waktu tunda muatan (time delay) dengan mengurangi jumlah gerbang yang dilewati sinyal muatan. Tabel kebenaran untuk penambah penuh diperlihatkan lagi pada tabel 6, pada tabel ini disertai juga kondisi di mana terjadi pembangkitan muatan. Isian 1, 2, 7, dan 8 memberikan contoh di mana muatan keluaran Ci bebas terhadap Ci-1. Pada isian 1 dan 2, muatan keluaran selalu 0, dan pada isian 7 dan 8 muatan keluaran selalu satu. Hal ini dikenal dengan kombinasi pembangkitan muatan. Isian 3, 4, 5, 6 memperlihatkan kombinasi masukan di mana muatan keluaran tergantung kepada muatan masukkan. Dengan kata lain, Ci adalah 1 hanya jika Ci-1 bernilai 1. hal ini disebut kombinasi perambatan muatan. Andaikan bahwa

G1 menyatakan kondisi pembangkitan muatan 1 dari tingkat I dari penambah jajar dan pi menyatakan kondisi perambatan muatan dari tingkat yang sama.

Isian	Ai	Bi	Ci-1	Ci	Kondisi
1	0	0	0	0	Tidak ada pembangkitan muatan
2	0	0	1	0	
3	0	1	0	0	Perambatan muatan
4	0	1	1	1	
5	1	0	0	0	
6	1	0	1	1	
7	1	1	0	1	Pembangkitan muatan
8	1	1	1	1	

Tanpa menyimpang dari kebiasaan, ambil penambahan dari dua angka biner 4 bit

$\boldsymbol{A = A_4A_3A_2A_1}$

Dan,

$\boldsymbol{B = B_4B_3B_2B_1}$

Dari tabel di atas, fungsi (penyambungan) perambatan muatan dan pembangkitan muatan dalam unsure Ai dan Bi, i=1, 2, 3, dan 4, diperoleh

$\boldsymbol{Gt = AtBt}$

$\boldsymbol{Pt = At + Bt = At \oplus Bt}$

Muatan keluaran kesatuan dari tingkat ke I dapat dinyatakan dalam unsure Gi, Pi, dan Ci-1, yang merupakan muatan keluaran kesatuan dari tingkat ke (i-1), sebagai

$Ci = G_t + P_i * C_{i-1}$

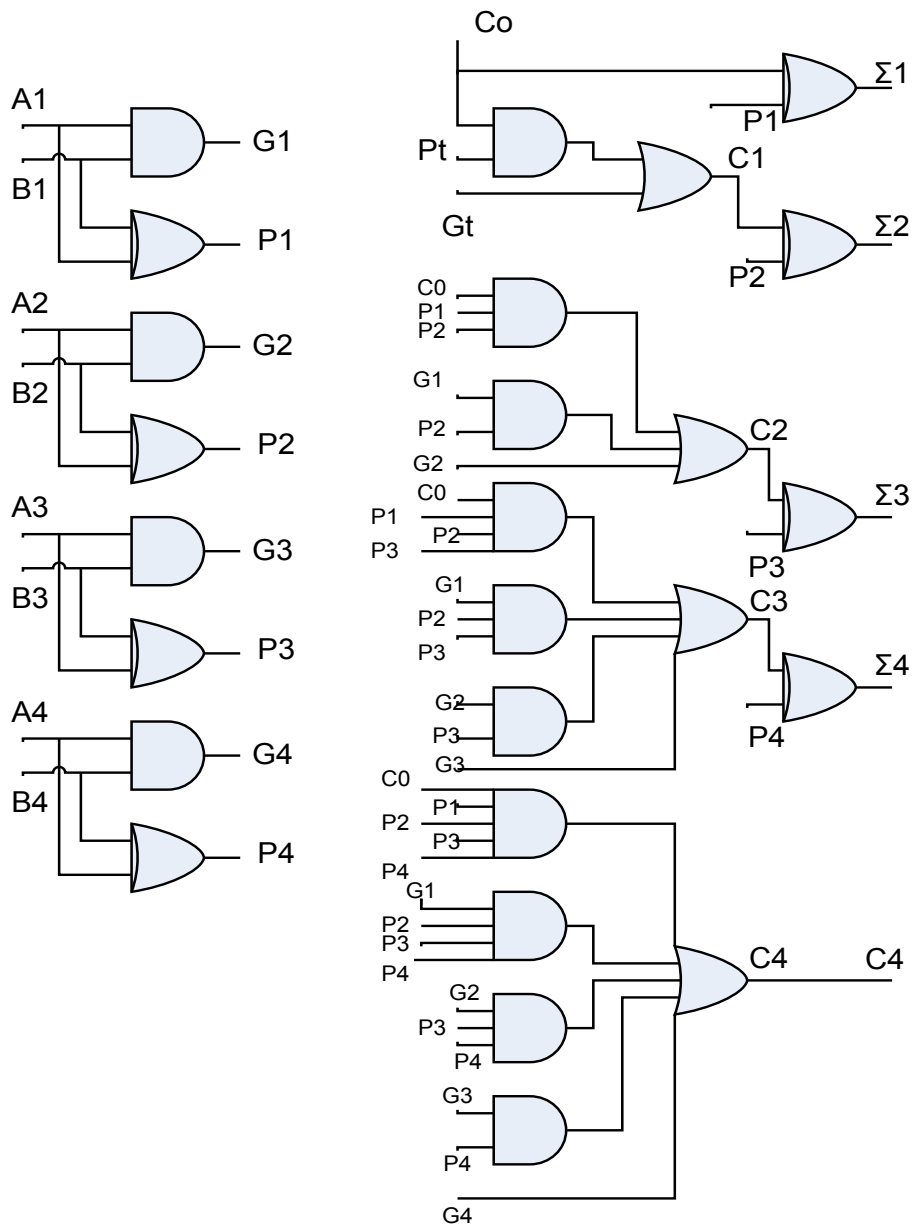
Sebagai contoh, untuk i=1, 2, 3, dan 4, Ct menjadi

$C_1 = G_1 + P_1 C_0$

$C_2 = G_2 + P_2 C_1 = G_2 + P_2 G_1 + P_2 P_1 C_0$

$C_3 = G_3 + P_3 C_2 = G_3 + P_3 G_2 + P_3 P_2 G_1 + P_3 P_2 P_1 C_0$

$C_4 = G_4 + P_4 C_3 = G_4 + P_4 G_3 + P_4 P_3 G_2 + P_4 P_3 P_2 G_1 + P_4 P_3 P_2 P_1 C_0$

Jumlah Σ dari A dan B: $\Sigma = C_4 \Sigma_4 \Sigma_3 \Sigma_2 \Sigma_1$, dimana $\Sigma_t = A_t \oplus B_t \oplus C_{i-1}$

Sebagai contoh,

$C_0=0$ (misalkan) $\Sigma_1=0$

$A_1=1$; $G_1=1$ $C_1=1$ $\Sigma_2=0$

$B_1=1$; $P_1=0$

$A_2=0$; $G_2=0$ $C_2=1$ $\Sigma_3=1$

$B_2=1$; $P_2=1$

$A_3=0;\ G_3=0$ $C_3=0$ $\Sigma_4=1$

$B_3=0;\ P_3=0$

$A_4=1;\ G_4=0$ $C_4=0$

$B_4=0;\ P_4=1$

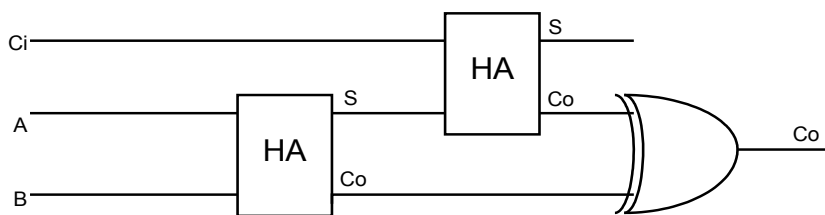
Periksa : A=1001 (9)

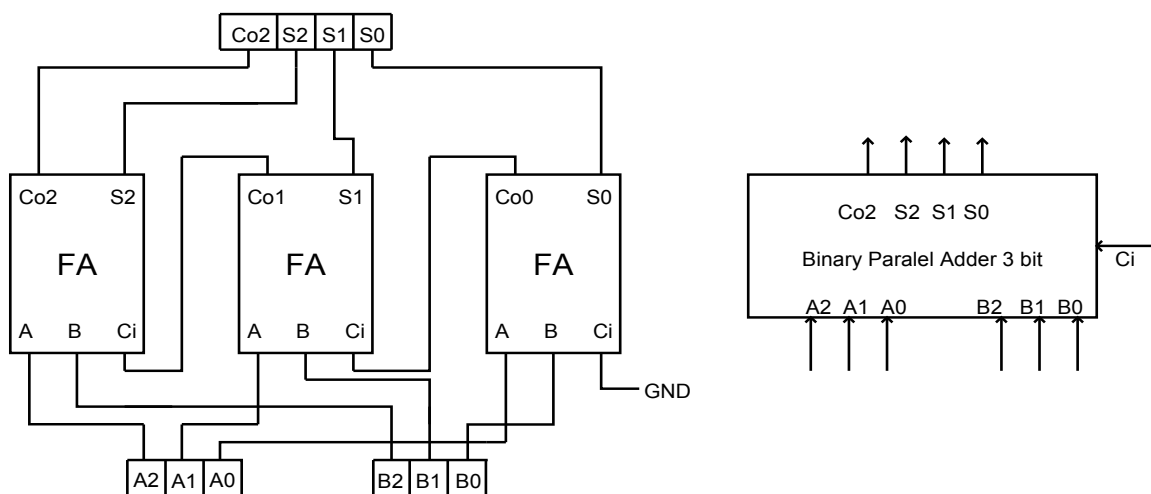
+B=0011 (3)

Σ=1100 (12)

Contoh Soal

Rancanglah suatu Full Adder (FA) yang dibentuk dari Half Adder (HA)

Jawab:

Rancanglah suatu penjumlah biner yang dapat menjumlahkan 2 data biner 3 bit

Jawab :

b) Pengurangan

Dalam proses pengurangan biner, dapat ditemukan jenis pengurang paro (Half Subtractor) dan pengurang penuh (Full Subtractor). Proses pengurangan dapat dilakukan secara komplemen ataupun biner secara langsung. Ingatlah kaidah-kaidah bagi pengurangan biner ;

0-0 = 0 dengan pinjaman 0

0-1 = 1 dengan pinjaman 1

1-0 = 0 dengan pinjaman 0

1-1 = 0 dengan pinjaman 0

Tabel 5.4 meringkaskan hasil-hasil ini dengan memberikan daftar kaidah pengurangan bagi A-B

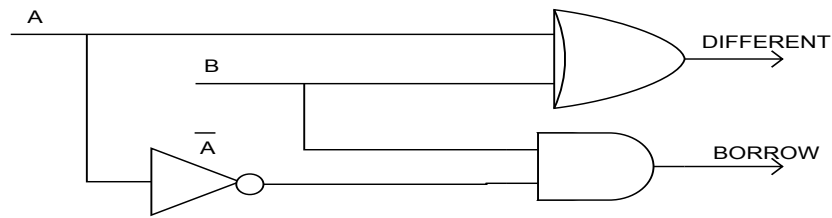
A	B	Bo	D
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	1	0	0

Ket : Bo = Borrow

D = Different

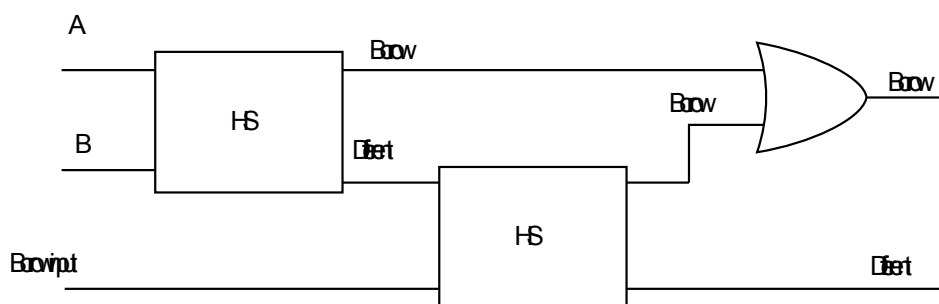
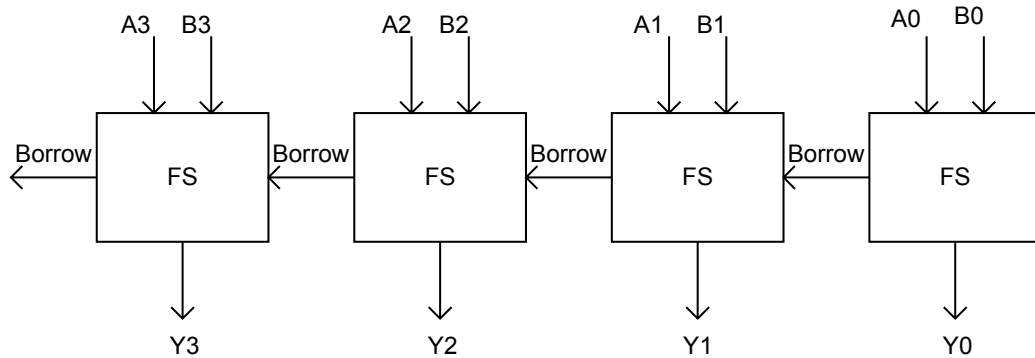
Rangkaian logika mana yang mempunyai tabel kebenaran seperti tabel 5.4?. pertama, keluaran Different adalah 1 bi;la A dan B berbeda. Maka, kita dapat menggunakan sebuah gerbang EX-OR untuk menghasilkan keluaran different ini. Selanjutnya, keluaran borrow adalah 1 hanya bila A adalah 0 dan B adalah 1. kita dapat memperoleh keluaran pinjaman ini dengan meng-AND-kan A dan B.

Gambar 4.18 memperlihatkan salah satu cara untuk membangun suatu rangkaian half subtractor yang mengurangkan sebuah angka biner dari angka lainnya. Rangkaian pada gambar 5.16 mempunyai tabel kebenaran identik dengan tabeel 5.4. Dapat Anda lihat bahwa pinjaman

(borrow) hanya ada bila A= 0 dan B = 1. selanjutnya, keluaran pinjaman (different) adalah sesuai bagi masing-masing di antara keempat kemungkinan kombinasi A-B.

Gambar 4.20 Half Subtractor

Half subtractor hanya menangani 2 bit pada suatu saat dan hanya dapat digunakan bagi kolom paling ringan (least significant) pada suatu masalah pengurangan. Untuk menangani kolom yang lebih tinggi, kita membutuhkan pengurang penuh (full subtractor). Gambar 5.17 memperlihatkan sebuah full subtractor; rangkaian ini menggunakan dua buah half adder dan sebuah OR gate.

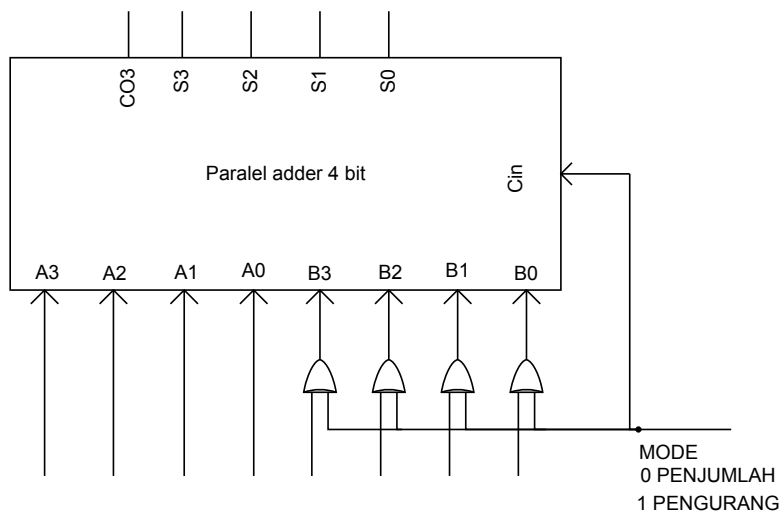
Half dan full subtractor adalah analog dengan half dan full adder; dengan menggandengkan half dan full subtractor seperti terlihat pada gambar 5.18, diperoleh suatu sistem yang secara langsung mengurangkan B3B2B1B0 dari A3A2A1A0.

Penambah dan pengurang memberikan rangkaian rangkaian dasar yang dibutuhkan bagi aritmatika biner; perkalian dan pembagian dapat dilakukan dengan penambahan dan pengurang berulang (dibahas dalam bab-bab selanjutnya, setelah kita membahas register).

Gambar 4.21 Full Subtractor

Gambar 4.22 Pengurang Paralel Biner 4 bit

Contoh Soal ;

1) Rancang suatu rangkaian penjumlah / pengurang yang dapat menjumlahkan atau mengurangkan 2 data biner komplemen 2 (4 bit) dengan keteneuan sebagai berikut :
   - Jika input mode operasi 0, maka rangkaian berfungsi sebagai adder
   - Jika input mode operasi 1, maka rangkaian berfungsi sebagai

subtractor

Jawab :

2) Rancanglah suatu pengurang biner yang dapat mengurangkan 2 data biner 3 bit

Evaluasi

A. Evaluasi Diri

PenilaianDiri					
Evaluasi diri ini diisi oleh siswa, dengan memberikan tanda ceklis pada pilihan penilaian diri sesuai kemampua siswa bersangkutan.					
No	**Aspek Evaluasi**	**Penilaian diri**			
		Sangat Baik (4)	**Baik (3)**	**Kurang (2)**	**Tidak Mampu (1)**
A	**Sikap**				
1	Disiplin				
2	Kerjasama dalam kelompok				
3	Kreatifitas				
4	Demokratis				
B	**Pengetahuan**				
1	Saya mampu menjelaskan pengertian encoder dan decoder				
2	Saya mampu menjelaskan pengertian multiplexer dan demultiplexer				
C	**Keterampilan**				
1	Saya mampu membuat rangkaian encoder dan decoder				
2	Saya mampu mendemonstrasikan rangkaian encoder dan decoder				

B. Review :

1) Apa yang dimaksud dengan Encoder Dan Decoder !
2) Jelaskan penggunaan Encoder Dan Decoder!
3) Jelaskan pengertian multiplexer dan demultiplexer !
4) Apa nama lain dari multiplexer ?

DAFTAR PUSTAKA

Agfianto Eko Putra, 2004, Belajar Mikrokontroler AT89C51/52/55, Yogyakarta, Gava Media.

Agus Sugiharto," Penerapan dasar Transducer dan sensor", Kanisius, Bandung, 2002

Danny Christanto, Panduan Dasar Mikrokontroller Keluarga MCS-51, Surabaya, 2008

Daryanto, Keterampilan Kejuruan Teknik Mekatronika, Sarana Tutorial Nurani Sejahtera, Bandung, 2011

Faul Fay dkk, Pengantar Ilmu Teknik Elektronika, Gramedia, Jakarta, 1988

Hermagasantos Zein, Teknik Tenaga Listrik, Rosada Jayaputra, Jakarta, 1996

Kilian, Christopher T, Modern Control Technology, (West Publishing Co : 1996)

Kismet Fadilah dkk), "Penerapan konsep dasar listrik dan elektronika", Angkasa, Bandung, 2000

Marthen Kanginan, Fisika SMU Kelas 2, Erlangga, Jakarta, 1996

OMRON, General Purpose Relay G2RS Datasheet

Pakpahan,Sahat.1988, Kontrol Otomatik Teori dan Penerapan, Erlangga.Jakarta

Rahmat Kuswandy, Teknik Pengendalian Elektronika, Titian Ilmua, Bandung, 1999.

Roger L Tokheim, "Elektronika digital", Erlangga, Jakarta, 1995

Soeparna & Bambang Soepatah, Mesin Listrik 2, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan. Direktorat Pendidikan Menengah Kejuruan, Jakarta 1979

Sulasno, Thomas ,1991, Dasar Sistem Kendali, Satya Wacana.Semarang

Sulham Setiawan,"Mudah dan Menyenangkan Belajar Mikrokontroler cet ke-2", Andi Yogya, 2008

Widodo Budiharto & Sigit Firmansyah, Elektronika digital + mikroprosesor, Andi Ygyakarta, Jakarta, 2008